

DOI: 10.19666/j.rlfed.202310160

W 火焰锅炉 SCR 脱硝超低排放技术及应用

罗志¹, 王晓冰¹, 潘栋¹, 何育东¹, 晋中华¹, 尚桐¹, 范玮²,
邓彪³, 任建永⁴, 兰永胜⁴, 杨小金³, 杨晓刚¹, 李淑宏¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;
2.西北工业大学动力能源学院, 陕西 西安 710129;
3.华能海南发电股份有限公司, 海南 海口 572631;
4.华能山东发电有限公司, 山东 济南 250013)

[摘要] 截至 2021 年底, 全国已有超过 95% 的燃煤火电机组实现了氮氧化物超低排放, 剩余均为燃用无烟煤的 W 火焰锅炉, 其产生的氮氧化物质量浓度高达 750~1 200 mg/m³, 实现超低排放难度大, 是我国实现超低排放政策的“最后一公里”。目前, 选择性催化还原 (SCR) 脱硝流场技术主要有“SCR 分区混合动态调平技术”“全烟道断面混合流场技术”“常规精准喷氨技术”等。以某设计脱硝效率需高达 95% 的 W 火焰锅炉为例, 通过计算流体力学 (CFD) 模拟的方式对比 3 种技术的性能指标, “SCR 分区混合动态调平技术”的各项指标明显优于其他技术。工程改造后, 在脱硝系统入口氮氧化物质量浓度为 1 000 mg/m³, 出口低于 50 mg/m³ 时, 可实时保持氨逃逸量小于 3 μL/L, 远超常规 SCR 脱硝系统最高设计效率 (93%), 为 W 火焰锅炉氮氧化物超低排放提供了新的技术路线。

[关键词] W 火焰锅炉; 脱硝; SCR; 流场技术; 氨逃逸; 分区混合

[引用本文格式] 罗志, 王晓冰, 潘栋, 等. W 火焰锅炉 SCR 脱硝超低排放技术及应用[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 99-109.
LUO Zhi, WANG Xiaobing, PAN Dong, et al. Ultra low emission technology of SCR flue gas denitration in W-flame boiler and the application[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 99-109.

Ultra low emission technology of SCR flue gas denitration in W-flame boiler and the application

LUO Zhi¹, WANG Xiaobing¹, PAN Dong¹, HE Yudong¹, JIN Zhonghua¹, SHANG Tong¹, FAN Wei²,
DENG Biao³, REN Jianyong⁴, LAN Yongsheng⁴, YANG Xiaojin³, YANG Xiaogang¹, LI Shuhong¹

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2.Department of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;
3.Huaneng Hainan Power Generation Co., Ltd., Haikou 572631, China;
4.Huaneng Shandong Power Generation Co., Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: By the end of 2021, over 95% of coal-fired thermal power units in China have achieved ultra-low emission of nitrogen oxides, with the remaining being W-flame boilers that burn anthracite. Due to the high mass concentration of nitrogen oxides generated, which often reaches 750~1 200 mg/m³, achieving ultra-low emissions is difficult, making it the “last mile” for China to achieve ultra-low emission policies. At present, selective catalyst reduction (SCR) denitration flow field technology mainly includes “SCR partition hybrid dynamic leveling technology”, “full flue section mixing flow field technology”, and “conventional accurate ammonia injection technology”, etc. Taking a W-flame boiler of which the design denitration efficiency needs to be up to 95% as an example, this paper compares the performance indicators of various technologies through CFD simulation, and the indicators of the “SCR partition hybrid dynamic leveling technology” are significantly superior to other technologies. After the project transformation, when the mass concentration of nitrogen oxides at the denitration

收稿日期: 2023-10-12

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ21-H46, HNKJ22-HF48); 陕西省重点研发计划项目资助 (2023-YBGY-289)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-H46, HNKJ22-HF48); Key Research and Development Program of Shaanxi (2023-YBGY-289)

第一作者简介: 罗志 (1986), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为烟气脱硝技术开发及应用, luozhi@tpri.com.cn。

system inlet is 1 000 mg/m³ and that at the system outlet is lower than 50 mg/m³, the ammonia escape can be kept less than 3 μL/L, far exceeding the maximum design efficiency of the conventional SCR denitration system. The research provides a new technical route for ultra-low NO_x emission of W-flame boilers.

Key words: W-flame boiler; denitration; SCR; flow field optimization; ammonia escape; zone mixing

截至 2021 年底, 达到超低排放限值的煤电机组容量已超 10 亿 kW, 占全国煤电总装机容量 95% 以上^[1-2]。超低排放改造后, 脱硝系统普遍出现了氨逃逸浓度超标, 空气预热器(空预器)出现硫酸氢铵堵塞的问题。究其原因, 无法实时保持催化剂入口截面氨氮摩尔比分布的高度均匀性是最为普遍和关键的因素^[3-6]。

SCR 脱硝流场模拟与物理模型试验可以得到烟道、导流板、喷氨系统、烟气混合器和整流格栅等烟道内构件的最优设计, 以取得在系统阻力及积灰程度最低条件下最优的烟气速度和烟气成分分布^[7-15]。目前, 用以满足超低排放的 SCR 流场技术, 主要有“SCR 分区混合动态调平技术”“全烟道断面混合流场技术”“常规精准喷氨技术”等。不同流场技术的技术理念不同、投资不同、适用条件不同、所取得的效果也不同。本文以国内某脱硝系统初始氮氧化物质量浓度高达 1 000 mg/m³ 的 660 MW 机组 W 火焰锅炉脱硝超低排放改造项目为实际案例, 分析对比以上各种技术所能达到的性能指标。

1 应用案例条件

1.1 案例设计条件

本案例为某 2×660 MW 机组 W 火焰锅炉超低排放改造项目。本次 SCR 脱硝系统优化提效改造的设计系统入口氮氧化物质量浓度按 1 000 mg/m³, 系统出口低于 50 mg/m³, 脱硝效率不低于 95%, 催化剂化学寿命期内氨逃逸量不高于 3 μL/L 进行设计, 远超出常规 SCR 脱硝效率 90%~93% 的设计上限。SCR 技术路线可节约 SNCR 的投资及运行费用, 具有广泛的市场前景。图 1 为该 SCR 脱硝系统的原流场结构。该案例对 SCR 脱硝系统流场指标提出了严苛的技术要求, 以体现出各类流场技术的优劣。

原 SCR 脱硝系统入口烟道分为省煤器出口的水平烟道、斜爬升烟道、下弯头、竖直烟道、顶部弯头及反应器顶盖和整流格栅等组成。在弯头处设置了较为粗放的导流板, 喷氨格栅位于竖直烟道中部。喷氨格栅将烟道从深度和宽度方向, 分为 2×6=12 个区, 可手动调节各分区的喷氨量。

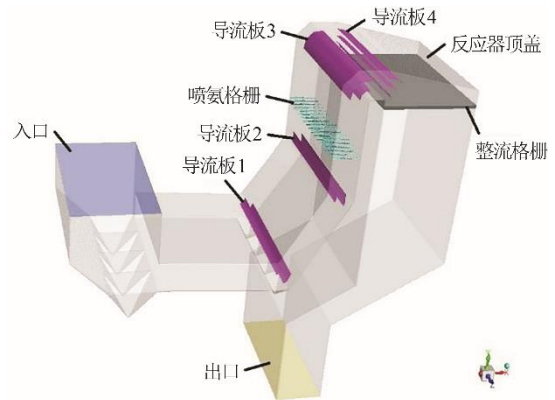


图 1 原 SCR 脱硝系统流场结构
Fig.1 Three-dimensional diagram of the original flow field structure

1.2 设计参数

锅炉设计和校核煤质见表 1, SCR 脱硝系统入口烟气参数见表 2。

表 1 设计煤质和校核煤质
Tab.1 Quality analysis for design coal and check coal

项目	设计煤质	校核煤质
收到基水分 $w_{ar}(M)/\%$	6.55	5.98
工业收到基灰分 $w_{ar}(A)/\%$	21.18	20.56
收到基挥发分 $w_{ar}(V)/\%$	9.58	6.15
干燥无灰基挥发分 $w_{daf}(V)/\%$	13.25	8.37
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	23.53	24.45
收到基碳分 $w_{ar}(C)/\%$	64.14	68.27
收到基氢分 $w_{ar}(H)/\%$	2.15	1.46
收到基氧分 $w_{ar}(O)/\%$	4.45	2.36
收到基氮分 $w_{ar}(N)/\%$	0.94	0.91
收到基硫分 $w_{ar}(S)/\%$	0.52	0.46

表 2 SCR 反应器入口烟气参数
Tab.2 Parameters of the flue gas at the SCR reactor inlet

项目	数值	备注
烟气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	1 869 261	标态, 湿基, 实际氧
O ₂ 体积分数/%	1.83	湿基
CO ₂ 体积分数/%	15.48	湿基
N ₂ 体积分数/%	74.11	湿基
烟气湿度/%	8.59	湿基
烟气温度/℃	410.00	100%BMCR
飞灰质量浓度/(g·m ⁻³)	44.00	$\alpha(O_2)=6\%$
SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	2 146.00	$\alpha(O_2)=6\%$
氮氧化物质量浓度/(mg·m ⁻³)	1 000.00	$\alpha(O_2)=6\%$
省煤器出口烟静压/Pa	-700.00	

1.3 测试结果

2018 年 4 月对 1 号机组 660 MW 及 500 MW 负荷 SCR 反应器入口氮氧化物质量浓度分布测试主要数据见表 3 和表 4^[16]。表 3 中孔 1—孔 8 表示烟道宽度方向布置的各孔；深 1—深 4 表示同一个测量孔由浅到深的测点。

表 3 1 号炉 660 MW 负荷 SCR 反应器入口 A 侧氮氧化物质量浓度分布 单位: mg/m³

Tab.3 Mass concentration distribution of nitrogen oxides on side A of SCR reactor inlet at 660 MW load of furnace 1

项目	孔 1	孔 2	孔 3	孔 4	孔 5	孔 6	孔 7	孔 8
深 1	1 132	1 196	1 107	1 033	966	878	860	758
深 2	1 152	1 216	1 127	1 053	986	898	880	778
深 3	1 122	1 186	1 097	1 023	956	868	850	748
深 4	1 082	1 146	1 057	983	916	828	810	708

表 4 1 号炉 500 MW 负荷 SCR 反应器入口 A 侧氮氧化物质量浓度分布 单位: mg/m³

Tab.4 Mass concentration distribution of nitrogen oxides on side A of SCR reactor inlet at 500 MW load of furnace 1

项目	孔 1	孔 2	孔 3	孔 4	孔 5	孔 6	孔 7	孔 8
深 1	916	975	912	946	864	872	948	1 006
深 2	936	995	932	966	884	892	968	1 026
深 3	906	965	902	936	854	862	938	996
深 4	866	925	862	896	814	822	898	956

从测试结果可见：660 MW 负荷时，A 侧 SCR 反应器入口平均氮氧化物质量浓度为 981 mg/m³，最大质量浓度与最小质量浓度偏差达到了 508 mg/m³；500 MW 负荷时，A 侧 SCR 反应器入口平均氮氧化物质量浓度为 920 mg/m³，最大质量浓度与最小质量浓度偏差达到了 212 mg/m³。氮氧化物质量浓度分布规律波动值可采用不同工况时烟道断面同一位置处氮氧化物质量浓度相对平均质量浓度的偏差来描述^[17]。可见，该机组 SCR 反应器入口质量浓度分布在不同负荷时波动值极大，达到 309 mg/m³。这对于 SCR 脱硝系统出口氮氧化物质量浓度稳定达到 50 mg/m³ 以下，且氨逃逸两不超标的要求，是极大的挑战。这是 W 火焰锅炉宽炉膛，且各燃烧器可独立投切等特点决定的，是脱硝难度最大的一类机组^[18-24]。

1.4 计算流体力学 (CFD) 模型及边界条件

为保证网格质量，对规则流通域采用结构化网格划分，喷氨格栅、混合器区域采用非结构化网格，总网格数量为 915 万。进行网格无关性验证时，当网格数量约 500 万以上时，计算结果偏差已在 1% 以内，

因此可认为网格数量为 915 万时，已满足网格无关性要求。建立 CFD 模型后，模型设置情况见表 5。

表 5 CFD 模拟模型设置情况
Tab.5 Model settings of CFD simulation

序号	名称	模型
1	Viscous Model	K-epsilon(2 eqn)
2	K-epsilon Model	Standard
3	Near-Wall treatment	Standard wall Functions
4	Species Model	Species Transport
5	催化剂层	Porous Zone/Laminar Zone

省煤器出口截面作为流通域边界，将其等分为深度 4、宽度 8 的 32 个小区域，每个区域为速度入口，其质量浓度分布按照不同工况采用表 3 和表 4 中实测数据，其余设置见表 6。

表 6 CFD 模拟边界条件
Tab.6 Boundary conditions of CFD simulation

序号	项目	
1	入口类型	Velocity Inlet
2	出口类型	Outflow
3	速度值/(m·s ⁻¹)	4.5
4	当地静压/Pa	-700
5	温度/K	683
6	成分	见表 2—表 4
7	催化剂总量/m ³	891
8	催化剂比表面积/(m ² ·m ⁻³)	314
9	催化剂活性/(m·h ⁻¹)	36

1.5 原流场校核模拟结果及分析

对原流场进行 CFD 建模，并采用 660 MW (工况 1) 和 500 MW (工况 2) 测得的氮氧化物质量浓度分布作为边界条件，烟气量均采用满负荷烟气量。图 2 为原流场流线图，图 3 为第一层催化剂入口流速分布。

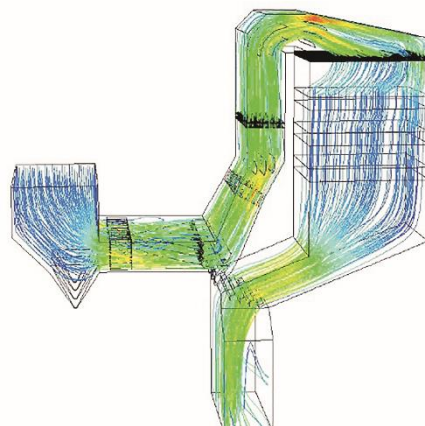


图 2 原流场流线

Fig.2 Original flow field streamline diagram

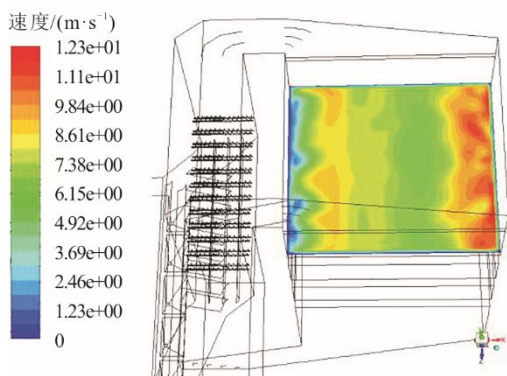


图3 第一层催化剂入口截面流速分布云
Fig.3 Cloud diagram of flow velocity distribution at the inlet of the first layer of catalyst

由图 2、图 3 可见：因顶部弯头、反应器顶盖及整流格栅的布置不合理，催化剂入口截面烟气流速偏差大，其相对标准偏差（CV）值达到 25.2%，指标远高于要求；流线入射催化剂时与垂直方向夹角过大，最大达到 45°，这将加剧催化剂磨损，以及各区域脱硝出力不均匀的情况^[25]。

为了显示原流场在工况 1 和工况 2 时，催化剂入口截面氨氮摩尔比分布所能达到的最高均匀程度，在 CFD 模拟时，根据 SCR 反应器出口各分区平均氮氧化物质量浓度分布情况，对喷氨格栅 12 个小分区的喷嘴流量进行了模拟状态下的“喷氨调平”。

喷氨调平方案有多种^[26-27]。在实际机组运行状态下，手工喷氨优化调平试验，往往采用以喷氨格栅喷氨支管布置情况，将喷氨格栅分为喷氨支管手阀对应的小分区，并假设每分区喷氨后，其以层流方式完全对应流动到脱硝系统出口，因此出口也将存在与其完全对应的测量分区。根据现场 SCR 脱硝系统出口测孔布置特点，采用网格法测量出 NO_x 质量浓度分布情况，并折算出各分区 NO_x 质量浓度。根据各分区 NO_x 质量浓度与平均质量浓度之间的差异，缓慢调整喷氨格栅各分区对应手阀，最终将出口 NO_x 质量浓度调整到最均匀状态。实际状态下，难以通过“影响因子法^[26]”将每个项目先进行流场模拟，得出喷氨分区与测量分区之间对应关系。因此，本文模拟喷氨调平的方案，采用与实际手工调平一致的方案，即为，在模拟状态下，可根据脱硝系统出口分区质量浓度分布，定量计算出相对于脱硝系统出口平均 NO_x 质量浓度，各喷氨分区的喷氨流量，以此将调整后各分区喷氨量作为模拟状态下最优调平状态。

图 4 为工况 1 和工况 2 时按照脱硝系统出口各分区的氮氧化物质量浓度分布，调整喷氨格栅各区域喷氨量后的氨氮摩尔比分布。由图 4 可见，这 2 个工况下，氨氮摩尔比分布均匀性差 CV 值分别为 6.74% 和 6.09%，在催化剂入口截面上最大值分别为 1.20 和 1.22，均远远超出 1.00，即相对于氮氧化物质量浓度氨过量，将产生大量氨逃逸^[28]。

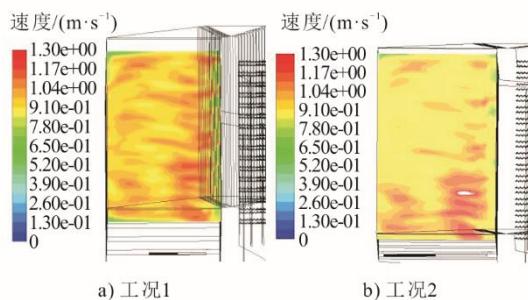


图4 首层催化剂入口截面氨氮摩尔比分布
Fig.4 Distribution of the ammonia-nitrogen molar ratio at inlet section of the first layer catalyst

2 不同流场技术方案及模拟结果对比

2.1 不同流场技术方案

要使 SCR 脱硝系统长期稳定运行，具备低氨逃逸浓度条件下的超高脱硝效率，必须具备足够的催化剂活性和用量，且催化剂入口断面长期可靠保持氨氮摩尔比分布均匀^[28]。由于 SCR 脱硝系统入口氮氧化物质量浓度因锅炉工况变化分布并不均匀且分布规律不稳定，需对 SCR 系统流场及喷氨系统进行升级，使得 SCR 系统具备实时调整各分区喷氨量的功能，以应对氮氧化物质量浓度分布的偏差和变化。目前，主流的技术有“SCR 分区混合动态调平技术”“全烟道断面混合流场技术”“常规精准喷氨技术”。

原 SCR 反应器入口流线入射催化剂角度极大，催化剂入口速度偏差大，造成催化剂局部严重冲刷磨损以及催化剂各区域出力不一致。这是由于反应器顶部烟道、导流板以及整流格栅结构形式不合理造成的。对该位置进行速度场优化，是后续进行分区测量及分区控制的前提条件。因此，本文假定各流场技术均对此部分进行优化（本文优化方案采用烟道和导流板“等阻法”），图 5 和图 6 分别为 SCR 反应器顶部优化后，流线及催化剂入口速度分布云图。优化后，烟气入射催化剂与垂直方向最大夹角小于 10°，速度分布 CV 值由优化前的 25.2% 降至 5.8%。

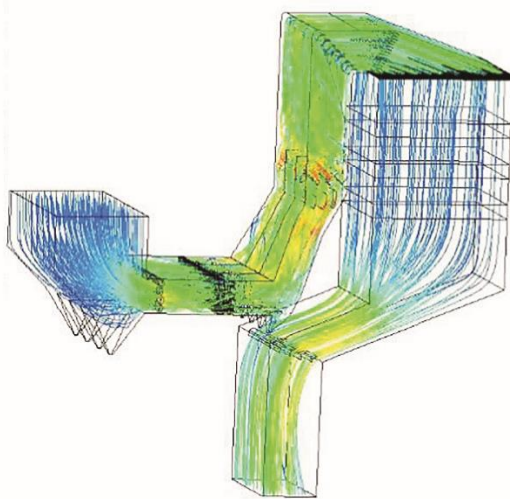


图5 反应器顶部优化后的流线
Fig.5 Streamline diagram after optimization at the top of the reactor

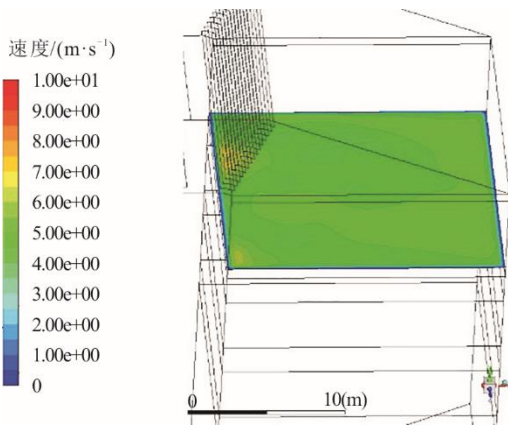


图6 反应器顶部优化后催化剂入口截面速度分布
Fig.6 Velocity distribution of catalyst inlet cross-sectional at the top of the reactor after optimization

图7—图9为实施“SCR分区混合动态调平技术”“全烟道断面烟气混合技术”“常规精准喷氨技术”后的流场。方案清单见表7。

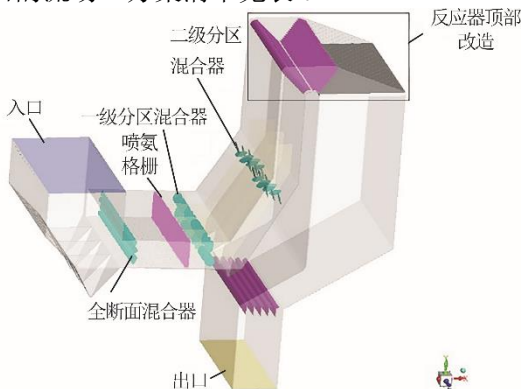


图7 SCR分区混合动态调平技术流场结构
Fig.7 Flow field structure diagram of SCR partition hybrid dynamic leveling technology

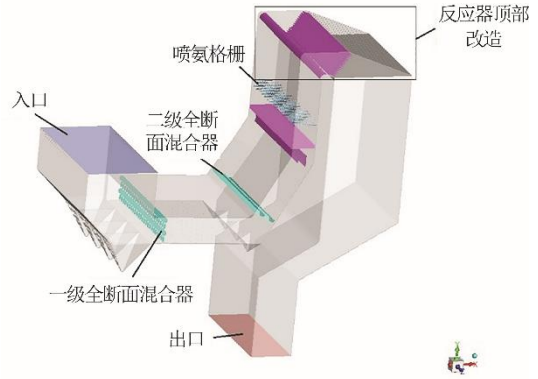


图8 全烟道断面烟气混合技术流场结构
Fig.8 Technical flow field structure diagram of full-section flue gas mixed flow field

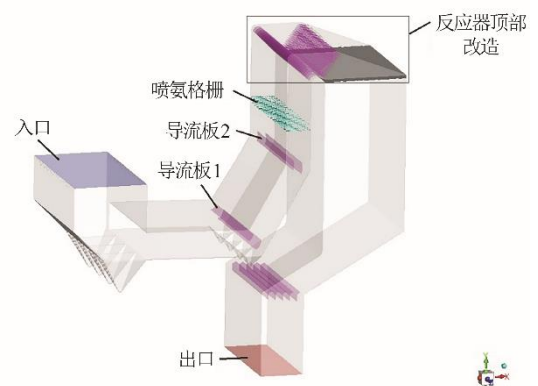


图9 常规精准喷氨技术流场结构
Fig.9 Three-dimensional diagram of flow field structure of conventional subregional ammonia injection automatic adjustment technology

由图7可见，“SCR分区混合动态调平技术”将喷氨格栅移位至省煤器出口水平烟道，并将其后烟道分为4个分区，每个分区内部加装两级分区烟气混合器，烟气在喷氨格栅后，经过两级分区混合器，烟气在各分区内进行了强烈的旋转交叉混合，分区之间烟气保持良好的独立性。在喷氨格栅前加装了全烟道断面烟气混合器以降低各分区间氮氧化物质量浓度偏差。同时，在SCR反应器出口各分区中心点加装氮氧化物质量浓度在线监测点，并实时调整各分区喷氨量。

由图8可见，“全烟道断面烟气混合技术”通过在喷氨格栅前布置两级全烟道断面烟气混合器，使烟气通过两级混合器后在全烟道左右方向内大范围进行交叉混合，降低了SCR反应器入口氮氧化物质量浓度分布偏差，从而提高喷氨格栅各小分区喷氨均匀性，减小各小分区阀门开度变化幅度；再对反应器顶盖及导流板进行优化，使催化剂入口速

度分布均匀。

由图 9 可见,“常规精准喷氨技术”对 SCR 反应器导流板及顶盖进行优化,使烟气速度在进入催化剂前均匀分布。原喷氨格栅小分区数量为 $2 \times 6 = 12$ 个,也将烟道按喷氨格栅分为 12 个小分区,并假定 SCR 反应器出口各分区内测得的烟气成分与喷氨格栅对应分区喷氨量一一对应。烟气从省煤器出口烟道至催化剂表面,未进行强制烟气混合,成分分布将基本维持初始状况。

表 7 各流场技术方案
Tab.7 The flow field technical solutions

技术	方案内容
SCR 分区混合动态调平技术	导流板及 SCR 反应器顶部改造; 喷氨格栅移位至省煤器出口水平烟道; 喷氨格栅前加装了全烟道断面烟气混合器; 将其后烟道分为 4 个分区,分区内部加装分区烟气混合器; 在 SCR 反应器出口各分区加装氮氧化物质量浓度在线监测点,并实时调整各分区喷氨量; 控制逻辑升级改造
全烟道断面烟气混合技术	导流板及 SCR 反应器顶部改造; 喷氨格栅前加装了一级全烟道断面烟气混合器; 斜段烟道入口加装了二级全烟道断面烟气混合器; 在 SCR 反应器出口各分区加装氮氧化物质量浓度在线监测点,并实时调整各分区喷氨量; 控制逻辑升级改造
常规精准喷氨技术	导流板及 SCR 反应器顶部改造; 在 SCR 反应器出口各分区加装氮氧化物质量浓度在线监测点,并实时调整各分区喷氨量; 控制逻辑升级改造

2.2 对比工况

为比较以上 3 种方案的性能指标,在同等条件下分别比较了 SCR 反应器入口各截面氮氧化物质量浓度最大偏差、催化剂入口氨氮摩尔比分布 CV 值、氨逃逸量和新增阻力。4 种不同边界条件,模拟了 4 种不同工况时各技术的性能指标,工况及代码分别为:

- 1) 工况 1 OPR-1, 入口氮氧化物质量浓度分布均匀, 进行模拟喷氨调平后;
- 2) 工况 2 OPR-2, 入口氮氧化物质量浓度按表 4 分布), 进行模拟喷氨调平后;
- 3) 工况 3 OPR-3, 入口氮氧化物质量浓度按表 3 分布, 进行模拟喷氨调平后;
- 4) 工况 4 OPR-4, 按工况 2 喷氨调平的调阀开度, 变化为工况 1 的氮氧化物质量浓度分布, 不进行喷氨调平。

OPT 表示 SCR 分区混合动态调平技术; CRO

表示全烟道断面混合技术; ORI/T 表示常规精准喷氨技术。

2.3 结果分析

图 10—图 12 分别为不同流场技术在工况 2 时, SCR 反应器入口各截面氮氧化物质量浓度分布。

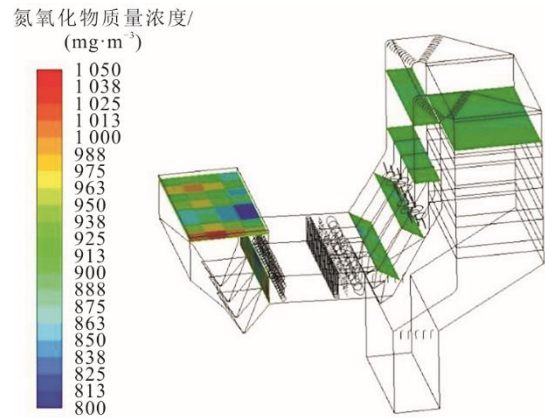


图 10 OPT 在工况 2 时各截面氮氧化物质量浓度分布
Fig.10 Distribution of mass concentration of NO_x in each section under Condition 2 (OPT)

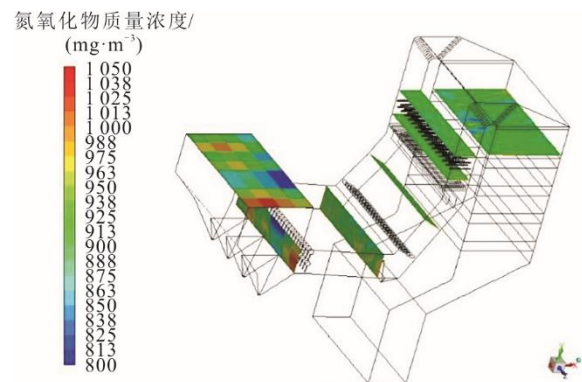


图 11 CRO 在工况 2 时各截面氮氧化物质量浓度分布
Fig.11 Distribution of mass concentration of NO_x in each section under Condition 2 (CRO)

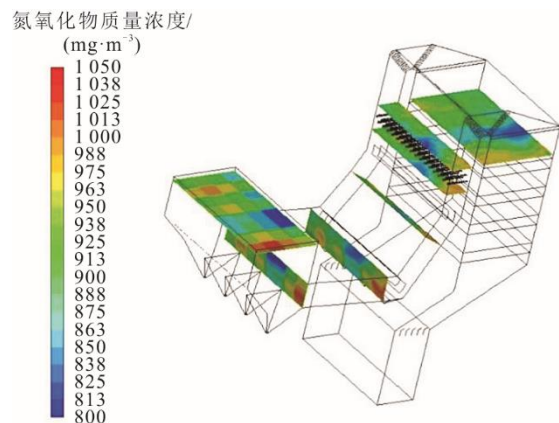


图 12 ORI/T 在工况 2 时各截面氮氧化物质量浓度分布
Fig.12 Distribution of mass concentration of NO_x in each section under Condition 2 (ORI/T)

图13为各考察截面位置示意，图14为不同流场技术在工况1和工况2下SCR反应器入口各截面氮氧化物质量浓度最大偏差。由图14可见：常规精准喷氨技术，不对烟气浓度场进行优化，在工况1和工况2下各截面氮氧化物质量浓度最大偏差从SCR反应器入口截面的509、213 mg/m³，分别缓慢降至催化剂入口截面的409、143 mg/m³，减小幅度分别为19.6%和32.8%；SCR分区混合动态调平技术经过3级烟气混合，各截面氮氧化物质量浓度最大偏差分别降至和286.2、26.0 mg/m³，下降幅度分别达到了43.8%和85.7%；全断面烟气混合技术经过两级烟气混合，各截面氮氧化物质量浓度最大偏差，迅速降至274.2、30.4 mg/m³，下降幅度分别达到了46.1%和87.8%。

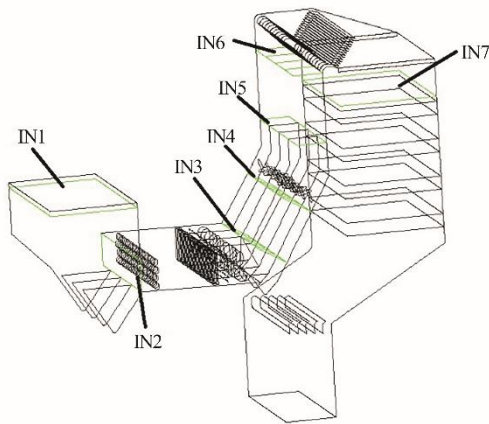


图 13 各考察截面位置示意

Fig.13 Schematic diagram of each inspection section

由此可见，SCR分区混合动态调平技术和全断面烟气混合技术对于提高催化剂入口氮氧化物质量浓度均匀性有明显的促进作用，可有效提高喷氨格栅调平品质，降低各分区喷氨量的变化幅度。

图15为不同流场技术在不同工况下，催化剂入口截面氨氮摩尔比分布CV值。由图15可见：在各种工况下SCR分区混合动态调平技术OPT催化剂入口截面氨氮摩尔比分布均匀性均显著优于另外2种技术；全断面烟气混合技术CRO和常规精准喷氨技术ORI/T，在工况OPR-1、OPR-2、OPR-3即使在喷氨调平的情况下，氨氮摩尔比分布CV值均高达10%左右，而且在假设不能自动调平的情况工况OPR-4下，其CV值显著增加到16.9%和18.4%。与其形成鲜明对比的是，SCR分区混合动态调平技术OPT在工况OPR-4时，各分区内的氨氮摩尔比分布CV平均值仍

然维持在2.4%的水平，大大降低了其氨逃逸量。

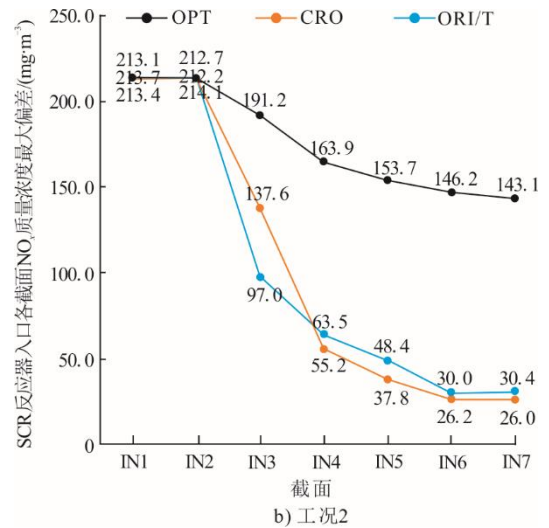
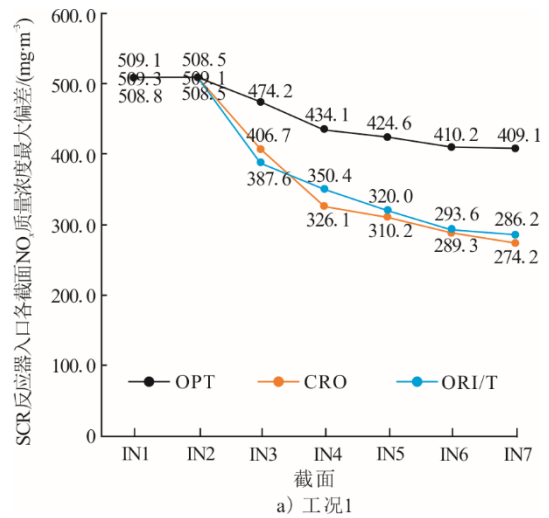


图 14 不同流场技术工况 1、工况 2 下 SCR 反应器入口各截面氮氧化物质量浓度最大偏差

Fig.14 The maximum deviation of NO_x mass concentration in each section of SCR inlet under Condition 2 when using different flow field technologies

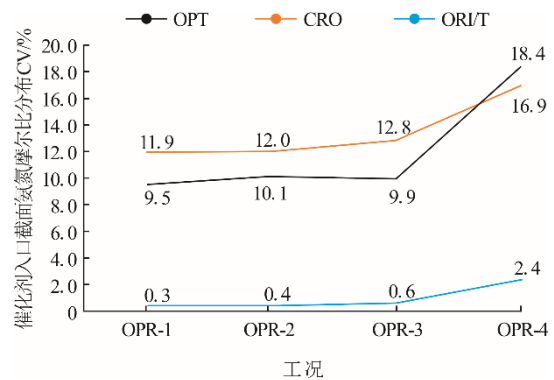


图 15 不同流场技术在不同工况下催化剂入口截面氨氮摩尔比分布 CV 值

Fig.15 The CV value of the ammonia-nitrogen molar ratio distribution in the inlet section of the catalyst under different conditions of different flow field technologies

图16为CFD模拟得到不同流场技术在不同工况时,SCR反应器出口平均氨逃逸量。由图16可知:工况1时仅OPT可在正常调平状态下达到 $3\ \mu\text{L}/\text{L}$ 以内的要求;其他2种技术即使进行出口分区测量及喷氨格栅分区调阀对应调节,氨逃逸量平均达到 $7.5\sim 13.1\ \mu\text{L}/\text{L}$;在工况OPR-4 CRO、ORI/T氨逃逸量显著增至 $18.9\sim 24.4\ \mu\text{L}/\text{L}$,而OPT对应的氨逃逸量也达到了 $12.8\ \mu\text{L}/\text{L}$ 。这说明,在SCR反应器入口氮氧化物质量浓度分布规律不稳定,偏差较大时,若不进行实时分区监测及动态调平,都将导致氨逃逸量超标。

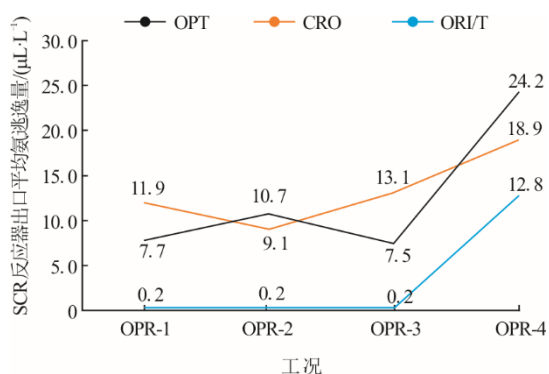


图16 不同流场技术在不同工况时SCR反应器出口平均氨逃逸量

Fig.16 The average ammonia escape concentration value at SCR outlet under different flow field technologies under different working conditions

经计算,在600 MW负荷条件下,模拟得到OPT喷氨调平后氨逃逸量分布如图17所示。由图17可知:4分区平均氨逃逸量分别为 0.27 、 0.32 、 0.22 、 $0.16\ \mu\text{L}/\text{L}$;4分区最大氨逃逸量分别为 0.30 、 0.60 、 0.48 、 $0.19\ \mu\text{L}/\text{L}$ 。

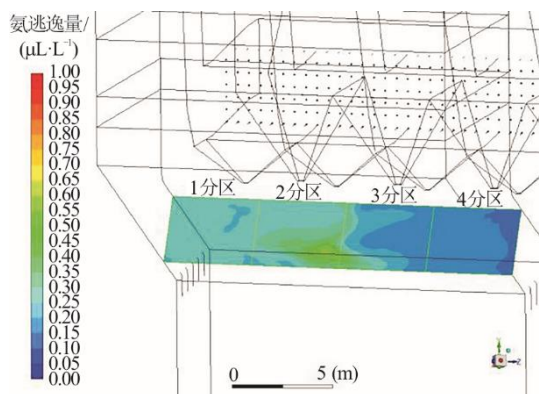


图17 OPT在工况1下氨逃逸量分布

Fig.17 The ammonia escape distribution of SCR partition hybrid dynamic leveling technology under Condition 1

经计算,“SCR分区混合动态调平技术”“全烟道断面混合流场技术”“常规精准喷氨技术”,相对于反应器顶部改造后的原始工况,满负荷时,新增阻力分别为 183 、 113 、 $0\ \text{Pa}$ 。

3 改造效果

该660 MW机组W火焰锅炉仅SCR分区混合动态调平技术可达到脱硝效率超过95%,且氨逃逸量稳定低于 $3\ \mu\text{L}/\text{L}$ 的要求。2019年5月1日,1号机组完成了SCR分区混合动态调平技术改造并投运,国网河北能源技术服务有限公司于2019年8月5日—8月10日对其进行了性能考试试验,各指标均优于技术协议要求^[29]。

图18为A/B侧SCR反应器入口性能试验11个测孔氮氧化物质量浓度分布。由图18可知:100%负荷下SCR反应器入口A/B侧断面上氮氧化物质量浓度平均值分别为 1101.02 、 $973.80\ \text{mg}/\text{m}^3$;氮氧化物质量浓度分布偏差分别达到 160 、 $336\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。出口氮氧化物质量浓度要控制到 $50\ \text{mg}/\text{m}^3$ 以内,难度较大。

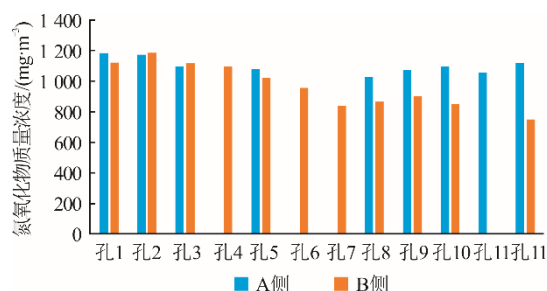


图18 100%负荷A/B侧SCR反应器入口氮氧化物质量浓度分布

Fig.18 Mass concentration distribution of NO_x at the SCR reactor inlet on the A/B side at 100% load

图19分别为100%负荷下A/B侧SCR反应器出口11个测孔 NO_x 质量浓度和氨逃逸量分布。由图19可知:SCR反应器出口A/B侧断面上氮氧化物质量浓度平均值分别为 38.57 、 $37.61\ \text{mg}/\text{m}^3$;氮氧化物质量浓度分布CV值分别为 16.1% 和 11.7% ;脱硝效率分别为 96.5% 和 96.15% ;氨逃逸量平均值分别为 2.07 、 $1.71\ \mu\text{L}/\text{L}$ 。氨逃逸量实测值比图16中模拟值偏大 $1.0\sim 1.5\ \mu\text{L}/\text{L}$,处于同一量级。产生偏差的原因主要有:1)模拟时按催化剂理论活性进行计算,而实际机组运行过程中,催化剂存在不同程度的磨损、积灰以及催化剂密封不严造成的漏风;2)氨逃逸量测量时,往往难以彻底排除吸收

液中背景氨的影响。因此,认为本模拟可很好地预测和反映各方案的性能。

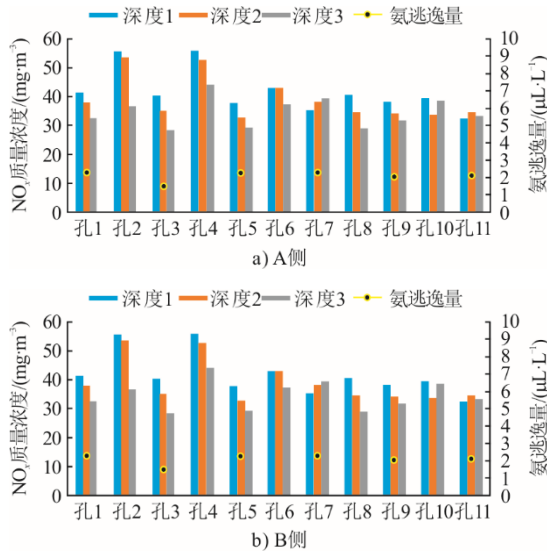


图 19 100% 负荷 A/B 侧 SCR 反应器出口氮氧化物质量浓度及氨逃逸浓度分布

Fig.19 Mass concentration distribution of NO_x and ammonia escape from SCR outlet on side B at 100% load

75% 负荷下, SCR 反应器入口 A/B 侧断面上氮氧化物质量浓度平均值分别为 974.57、912.75 mg/m^3 ; SCR 反应器出口 A/B 侧断面上氮氧化物质量浓度平均值分别为 41.63、36.79 mg/m^3 ; 脱硝效率分别为 95.73% 和 95.97%; 氮氧化物质量浓度 CV 值分别为 17.5% 和 18.7%; 氨逃逸浓度平均值分别为 1.58、1.40 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。50% 负荷下, SCR 反应器入口 A/B 侧断面上氮氧化物质量浓度平均值分别为 922.61、879.31 mg/m^3 ; SCR 反应器出口 A/B 侧断面上氮氧化物质量浓度平均值分别为 40.74、39.86 mg/m^3 ; 脱硝效率分别为 95.59% 和 95.47%; 氮氧化物质量浓度 CV 值分别为 17.5% 和 16.2%; 氨逃逸浓度平均值分别为 0.70、0.51 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。

由以上实际测试结果来看,此次改造效果达到了预期,脱硝系统脱硝效率长期稳定超过 95%,且氨逃逸浓度稳定控制在 3 $\mu\text{L}/\text{L}$ 以下。

4 结 论

本文针对国内某 660 MW 机组 W 火焰锅炉, SCR 脱硝系统氮氧化物质量浓度超高(1 000 mg/m^3),需控制到 50 mg/m^3 以内,氨逃逸稳定低于 3 $\mu\text{L}/\text{L}$ 的技术要求,采用“SCR 分区混合动态调平技术”“全烟道断面混合流场技术”“常规精准喷氨技术”3 种方案进行 CFD 模拟计算,分析对比结果如下。

1) 工况 1 和工况 2 下,常规精准喷氨技术可使 SCR 反应器入口各截面氮氧化物质量浓度最大偏差减小 19.6% 和 32.8%,SCR 分区混合动态调平技术减小 43.8% 和 85.7%,全断面烟气混合技术减小 46.1% 和 87.8%。

2) 各种工况下,SCR 分区混合动态调平技术催化剂入口截面氨氮摩尔比分布均匀性均显著优于另外 2 种技术。工况 OPR-1、OPR-2、OPR-3 下,即使在喷氨调平的情况下,全烟道断面烟气混合技术和常规精准喷氨技术氨氮摩尔比分布 CV 值均高达 10% 左右。在假设不能自动调平的情况下,工况 OPR-4 时,全断面烟气混合技术和常规精准喷氨技术 CV 值显著增加到 16.9% 和 18.4%。SCR 分区混合动态调平技术在工况 OPR-4 时,各分区内的氨氮摩尔比分布 CV 平均值仍然维持在 2.4% 的水平,大大降低了其氨逃逸量。

3) 工况 1 时,仅 SCR 分区混合动态调平技术可在正常调平状态下,氨逃逸达到 3 $\mu\text{L}/\text{L}$ 以内的要求;其他 2 种技术,即使进行出口分区测量及喷氨格栅分区调节,平均氨逃逸也高达 7.5~13.1 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。工况 OPR-4 下其他 2 种技术氨逃逸分别显著增至 18.9~24.4 $\mu\text{L}/\text{L}$,同时 SCR 分区混合动态调平技术对应的氨逃逸平均值也达到 12.8 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。这说明,在 SCR 入口氮氧化物质量浓度分布规律不稳定,偏差较大时,若不进行实时分区监测及动态调平,都将导致氨逸水平超标。

4) “SCR 分区混合动态调平技术”“全烟道断面混合流场技术”“常规精准喷氨技术”,相对于原始状况,满负荷时新增阻力分别为 183、113、0 Pa,对系统阻力影响均较小。

5) 对 1 号机组进行 SCR 分区混合动态调平技术改造后,高、中、低 3 个负荷下脱硝效率均高于 95%,氨逃逸浓度稳定低于 3 $\mu\text{L}/\text{L}$,且喷氨自动控制全程投入。经统计,同等条件下,氨耗量相对于改造前下降约 9%。

[参 考 文 献]

- [1] 人民网. 我国实现超低排放的煤电机组超十亿千瓦 [EB/OL]. (2022-04-26)[2022-06-25]. <http://finance.people.com.cn/n1/2022/0426/c1004-32408678.html>.
- [2] 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[J]. 节能与环保, 2016(1): 32-33.
- Ministry of Environmental Protection, National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Fully implement the ultra-low emission and energy-saving renovation plan for coal-fired power plants[J]. Energy Saving and Environmental Protection, 2016(1): 32-33.
- [3] 尤良洲. 燃煤机组 SCR 装置运行现状调查及存在问题分析[J]. 电力科技与环保, 2015, 31(6): 36-38.
- YOU Liangzhou. Survey on operation condition and in existing problems of SCR facilities in coal-fired units[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2015, 31(6): 36-38.
- [4] 张洁, 张扬. 燃煤电站 SCR 烟气脱硝工程技术关键问题研究[J]. 电力科技与环保, 2011, 27(2): 38-41.
- ZHANG Jie, ZHANG Yang. Research on key technical issues of SCR flue gas denitrification in coal-fired power plants[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2011, 27(2): 38-41.
- [5] 张荀, 柏源, 刘涛, 等. 火电厂氮氧化物控制对策研究[J]. 电力科技与环保, 2014, 30(1): 30-32.
- ZHANG Xun, BO Yuan, LIU Tao, et al. Thinking on control strategy and problems of industrialization for nitrogen oxides control in thermal power industry[J]. Thermal Power Generation, 2014, 30(1): 30-32.
- [6] 李伟, 徐强, 孔德安, 等. 电站锅炉 SCR 脱硝系统联合运行优化模型[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 46-52.
- LI Wei, XU Qiang, KONG De'an, et al. Optimization model for joint operation of SCR denitrification system in power plant boilers[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 46-52.
- [7] 董陈, 乔海勇, 牛国平, 等. 某 600 MW 机组 SCR 烟气脱硝装置优化设计[J]. 热力发电, 2014, 43(12): 99-104.
- DONG Chen, QIAO Haiyong, NIU Guoping, et al. Optimization design of SCR flue gas denitrification device for a 600 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(12): 99-104.
- [8] 张祥翼, 罗志, 尚桐, 等. SCR 防堵灰型流场优化技术及工程应用[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 110-114.
- ZHANG Xiangyi, LUO Zhi, SHANG Tong, et al. Optimization technology and engineering application of SCR anti clogging ash flow field[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 110-114.
- [9] 郭浩, 陈国伟, 李发军. 动态喷氨格栅在 SCR 脱硝工艺中的应用研究[J]. 电力科技与环保, 2016, 32(1): 9-12.
- GUO Hao, CHEN Guowei, LI Fajun. Research of dynamic ammonia injection grid on SCR denitrification process [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2016, 32(1): 9-12.
- [10] 姚伟, 何红光, 刘家利. 煤灰沾污性能判别试验研究[J]. 热力发电, 2010, 39(3): 65-69.
- YAO Wei, HE Hongguang, LIU Jiali. Test on distinguishing contamination properties of coal ash[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(3): 65-69.
- [11] 乐长义. 燃煤的燃烧性结渣性和积灰性评价技术[J]. 华东电力, 1985(15): 6-18.
- LE Changyi. Coal combustion of slagging and fouling Evaluation Technology[J]. East China Electric Power, 1985(15): 6-18.
- [12] 王林. 燃煤飞灰沉积特性的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 1-2.
- WANG Lin. Experimental study on characteristics of coal ash deposition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 1-2.
- [13] 樊建人, 周大冬, 岑可法. 煤灰粒子冲击管束的碰撞和磨损研究[J]. 工程热物理学报, 1989, 10(4): 452-455.
- FAN Jianren, ZHOU Dadong, CEN Kefa. An investigation of tube banks erosion by coal ash impaction [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1989, 10(4): 452-455.
- [14] 安敬学, 王磊, 秦淇. 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. Mechanism research on catalyst attrition in SCR denitration system and the treatment[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(12): 119-125.
- [15] 王震. 我国煤炭市场形势分析及对策建议[J]. 煤炭经济研究, 2017, 37(3): 43-46.
- WANG Zhen. Analyzed the situation of coal market and countermeasure proposals[J]. Coal Economic Research, 2017, 37(3): 43-46.
- [16] 舒凯, 罗志. 华能邯郸电厂 1 号机组 SCR 摸底试验报告[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2018: 11-12.
- SHU Kai, LUO Zhi. SCR bottom-up test report for unit 1 of Huaneng Hanfeng Power Plant[R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 2018: 11-12.
- [17] 许剑, 罗志, 周鑫, 等. W 火焰锅炉 SCR 分区混合动态调平技术及应用[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 234-242.
- XU Jian, LUO Zhi, ZHOU Xin, et al. SCR partition mixed dynamic leveling technology and its application in W-flame boiler[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 234-242.
- [18] 邓伟力, 陈东林, 刘良华, 等. W 火焰锅炉机组低氮燃烧、SNCR、SCR 联合脱硝技术[J]. 长沙理工大学学报, 2018, 15(2): 88-93.
- DENG Weili, CHEN Donglin, LIU Lianghua, et al. Low nitrogen combustion, SNCR, SCR combined denitrification technology for W-flame boiler unit[J]. Journal of Changsha University of Technology, 2018, 15(2): 88-93.
- [19] 张波, 徐宏杰, 张向宇, 等. W 火焰锅炉 SNCR 烟气脱硝工艺优化[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 99-103.
- ZHANG Bo, XU Hongjie, ZHANG Xiangyu, et al. Optimization of SNCR flue gas denitrification process for W-flame boiler[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 99-103.
- [20] 时光, 张扬, 裴煜坤, 等. 某 2×600 MW 机组“W”火焰锅炉氮氧化物超低排放改造方案分析[J]. 热电与空调, 2017, 38(3): 6-9.
- SHI Guang, ZHANG Yang, PEI Yukun, et al. Analysis of the nitrogen oxide ultra-low emission transformation plan for the “W” flame boiler of a certain 2×600 MW unit[J]. Thermal Power and Air Conditioning, 2017, 38(3): 6-9.
- [21] 张扬, 蒋志强, 孙路长, 等. W 火焰锅炉 NO_x 超低排放技术路线分析与讨论[J]. 电力科技与环保, 2019, 35(1): 4-6.
- ZHANG Yang, JIANG Zhiqiang, SUN Luchang, et al. Analysis and discussion of NO_x ultra low emission technology route for W-flame boiler[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2019, 35(1): 4-6.
- [22] 方朝君, 王丽朋, 刘鹏, 等. W 型火焰锅炉脱硝 NO_x 分布优化技术应用[J]. 电力安全技术, 2018, 20(7): 47-50.

- FANG Zhaojun, WANG Lipeng, LIU Peng, et al. Application of optimization technology for NO_x distribution in W-shaped flame boiler denitration[J]. Electric Safety Technology, 2018, 20(7): 47-50.
- [23] 武宝会, 李刚, 薛大禹, 等. SCR Control+脱硝控制系统研究及其在 660 MW 机组的应用[J]. 热力发电, 2017, 50(11): 175-184.
- WU Baohui, LI Gang, XUE Dayu, et al. Research on SCR control+denitration control system and its application in 660 MW units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 50(11): 175-184.
- [24] 王建峰, 尤良洲, 胡姐, 等. “W”火焰锅炉脱硝超低排放技术与经济分析[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 38-40.
- WANG Jianfeng, YOU Liangzhou, HU Da, et al. “W” flame boiler denitrification ultra-low emission technology and economic analysis[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 38-40.
- [25] 杨晓刚, 罗志. 华能邯峰发电有限公司 SCR 流场优化设计报告[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2018: 22-28.
- YANG Xiaogang, LUO Zhi. Optimization design report on SCR flow field of Huaneng Hanfeng Power Generation Co., Ltd.[R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 2018: 22-28.
- [26] 卢志民, 李文庆, 廖永进, 等. 基于影响因子的 SCR 脱硝系统喷氨量优化模拟[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4923-4930.
- LU Zhimin, LI Wenqing, LIAO Yongjin, et al. Optimization simulation of ammonia injection rate in SCR denitrification system based on influencing factors[J]. Proceeding of the CSEE, 2021, 41(14): 4923-4930.
- [27] 宋绍伟, 赵虎军, 丁先, 等. 660 MW 机组 SCR 装置精细化喷氨改造研究[J]. 华北电力大学学报, 2020, 47(3): 75-82.
- SONG Shaowei, ZHAO Hujun, DING Xian, et al. Application of optimization technology for NO_x distribution in W-shaped flame boiler denitration[J]. Journal of North China Electric Power University, 2020, 47(3): 75-82.
- [28] 林伟杰, 牛国平, 白少林, 等. 火电厂烟气污染物超低排放技术[M]. 1 版. 北京: 中国电力出版社, 2015: 91-92.
- LIN Weijie, NIU Guoping, BAI Shaolin, et al. Ultra low emission technology for flue gas pollutants in thermal power plants[M]. 1st ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 91-92.
- [29] 韩忠阁, 车凯. 华能邯峰电厂 1 号机组脱硝喷氨优化改造工程性能考核试验[R]. 石家庄: 国网河北能源技术服务有限公司, 2019: 9-12.
- HAN Zhongge, CHE Kai. Performance assessment test for the optimization and renovation project of denitrification and ammonia injection in Unit 1 of Huaneng Hanfeng Power Plant[R]. Shijiazhuang: State Grid Hebei Energy Technology Service Co., Ltd., 2019: 9-12.

(责任编辑 杨嘉蕾)