

非均匀来流条件下 SCR 系统静态混合器布置及喷氨优化数值模拟研究

李源¹, 毛睿¹, 任利明¹, 岑可法²

(1. 润电能源科学技术有限公司, 河南 郑州 450052; 2. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对某 650 MW 机组 W 炉 SCR 系统静态混合器在非均匀来流条件下的布置及喷氨优化进行了数值模拟研究。通过分析常规导流板设计下 SCR 系统内流场, 提出利用静态混合器对 SCR 系统进行分区流场优化。大范围混合器布置在脱硝入口烟道, 分区混合器布置在喷氨格栅下游并将烟道划分为 3 个分区。经分区流场优化后, SCR 系统内流速、温度和 NO_x 浓度分布均有明显改善, 首层催化剂入口氨氮摩尔比峰值从 1.50 降至 1.06, 但系统阻力增加了 177 Pa。为了进一步改善 SCR 系统内氨氮匹配性, 提出分区喷氨优化方案。经分区喷氨优化后, 首层催化剂入口的氨氮摩尔比峰值从 1.06 降至 0.98。在非均匀来流边界条件下, 分区流场优化结合分区喷氨优化是改善 SCR 系统内部流场并降低氨逃逸率的最优方案。

关键词: SCR; 非均匀来流; 静态混合器; 分区喷氨; 数值模拟

中图分类号: X701 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.06.012

[引用本文格式] 李源, 毛睿, 任利明, 等. 非均匀来流条件下 SCR 系统静态混合器布置及喷氨优化数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(6): 78-85. LI Yuan, MAO Rui, REN Li-ming, et al. Numerical simulation of static mixer layout and ammonia injection optimization of a SCR system under non-uniform intake flow conditions[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(6): 78-85.

Numerical Simulation of Static Mixer Layout and Ammonia Injection Optimization of a SCR System under Non-uniform Intake Flow Conditions

LI Yuan¹, MAO Rui¹, REN Li-ming¹, CEN Ke-fa²

(1. Rundian Energy Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou, China, Post Code: 450052; 2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027)

Abstract: The numerical simulation study on the static mixer layout and ammonia injection optimization of the SCR system in a 650 MW W-flame boiler under non-uniform intake flow conditions was carried out. Under the non-uniform intake flow conditions, the flow field of the SCR system with the normal guide plates was analyzed, and then the static mixers were proposed for the partitioned flow field optimization. The wide range mixers were installed in the inlet flue duct of the SCR system. The zonal mixers were installed in the downstream of the ammonia injection grid (AIG), and the flue dust was divided into 3 sections. After the partitioned flow field optimization, the distributions of velocity, temperature and NO_x concentration of the SCR system were improved dramatically, and the NH_3/NO_x peak molar ratio at the entrance of the first catalyst layer was reduced from 1.50 to 1.06, but the system resistance was increased by 177 Pa. The partitioned ammonia injection optimization was proposed to further improve the ammonia nitrogen matching in the SCR system. After the partitioned ammonia injection optimization, the NH_3/NO_x peak molar ratio at the entrance of the first catalyst layer was reduced from 1.06 to 0.98. For the improve-

ment of the SCR flow field and the reduction of the ammonia escape, the optimum solution was to combine the partitioned flow field optimization with the partitioned ammonia injection optimization.

Key words: SCR, non-uniform intake flow, static mixer, partitioned ammonia injection, numerical simulation

引言

选择性催化还原法(Selective catalytic reduction, SCR)脱硝技术是一种脱硝效率高、技术成熟的烟气脱硝技术,广泛应用于燃煤电厂^[1-2]。

SCR超低排放技术主要通过增加催化剂和喷氨量等手段提高脱硝效率。在脱硝效率提升后,SCR系统内流场不均引起的氨逃逸率超标问题更加突出,造成空气预热器硫酸氢铵沉积及堵灰^[3]。因此,如何提高SCR系统内氨氮匹配性,充分发挥催化剂作用,是实现脱硝系统超低排放的有效途径。SCR系统流场优化和喷氨调整是降低系统氨逃逸率的两种主要手段。大量学者对SCR系统内流场进行了数值模拟研究^[4-8]。Xu等人^[4]利用数值模拟方法研究了混合网格、导流板及整流格栅等对SCR系统内速度和浓度场分布的影响。俞斌^[9]通过数值模拟研究了静态混合器对SCR系统内流场的影响,研究表明静态混合器明显改善了SCR系统内速度和 NO_x 质量浓度分布均匀性,但增加了系统阻力。然而,以上研究^[4-9]均是针对均匀来流条件下SCR系统内流场的数值模拟研究。陈海杰等人^[10]针对选择性非催化还原法(Selective Non-catalytic Reduction, SNCR) + SCR耦合脱硝系统流场进行了研究,SNCR脱硝严重影响SCR入口流场,造成SCR系统出口氨逃逸率超标。为提高SCR系统内氨氮匹配性,赵大周等人^[11]通过数值模拟研究了喷氨方式对SCR反应的影响,研究表明增加喷氨格栅分区会获得更佳的脱硝效果。吴学智等人^[12]提出将一种基于迭代法的喷氨调节量计算方法,用于SCR系统流场优化,该方法可以快速实现SCR系统非均匀喷氨方案的设计。Liu等人^[13]利用数值模拟方法分析了各喷氨支管对应区域的 NO_x 流量权重因子及其敏感度,发现通过改变“临界”喷氨支管喷氨量,结合智能调整策略可以实现脱硝精准喷氨。

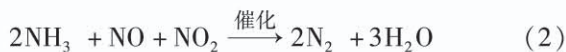
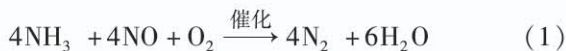
高畅等人^[14]研究了SCR系统在非均匀来流条件下的喷氨策略,分析了喷氨格栅中喷口密度、开孔率、喷口角度等结构参数对SCR反应器内氨氮摩尔比分布均匀性的影响。

目前,燃煤电厂普遍存在脱硝入口流场分布不均的现象,尤其W炉脱硝入口流场在横向分布上极为不均。本文以某650 MW机组W炉SCR系统为研究对象,利用数值模拟方法研究非均匀来流条件下的SCR系统内流场分布特征。为提升SCR系统内氨氮匹配性,利用静态混合器并配合喷氨优化,改善SCR系统内流场分布、提高喷氨调节能力和降低系统氨逃逸率。

1 研究方法

1.1 系统概况及评价指标

某650 MW燃煤机组采用美国巴威公司生产的W型锅炉,每台锅炉配置2台SCR反应器。图1为SCR系统布置图。SCR系统布置于省煤器出口与空气预热器入口之间。SCR还原剂为液氨,氨气与稀释风混合后由喷氨格栅喷入烟道,氨体积浓度为5%。SCR催化剂采用蜂窝式 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 基催化剂,按“3+1”层布置。SCR脱硝技术的主要反应机理为^[15]:



考虑2台SCR反应器对称布置在锅炉中心线两侧,因此仅针对左侧SCR反应器进行数值模拟研究。

SCR系统关键截面均匀性特征量的定义为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$\text{CV} = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (5)$$

$$d_{\max} = \max(|x_{\max} - \bar{x}|, |x_{\min} - \bar{x}|) \quad (6)$$

式中: x —变量; $\bar{x}$ — x 的平均值; σ — x 的标准偏差; CV — x 的相对偏差; $d_{\max}$ — x 的最大绝对偏差; x_i — x 在取样点 i 处的值; n —取样点数; $x_{\max}$ — x 的最大值; $x_{\min}$ — x 的最小值; $\max()$ —最大值函数。

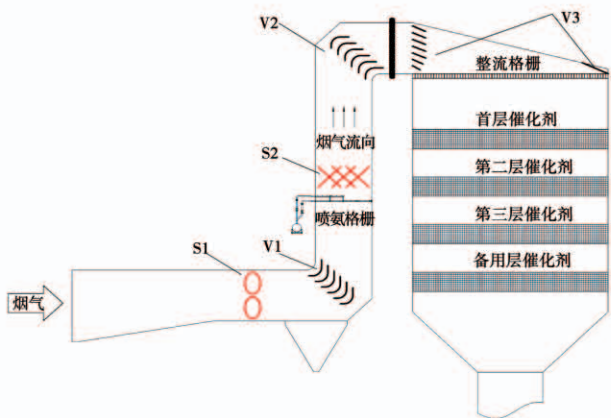


图1 SCR系统布置图

Fig.1 Layout of the SCR system

1.2 数学模型及边界条件

在 SCR 系统建模及网格划分中,喷氨格栅和导流装置区域附近采用四面体网格,其他区域采用六面体网格。采用雷诺时均法对各组分建立输运方程,包括质量守恒方程、动量守恒方程、组分守恒方程和能量守恒方程。选用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型求解烟气湍流过程。控制方程采用控制容积法进行离散,采用 SIMPLE 算法求解动量方程,对流项差分格式采用二阶迎风格式,催化剂层采用多孔介质模型。经网格无关性验证,最终网格数约为 346 万。

试验发现脱硝入口速度、温度和 NO_x 浓度场均呈现靠近炉膛中心线高、两侧低的现象。依据试验结果,定义一种左、右侧方向上分布不均的入口边界条件,脱硝入口速度相对偏差为 40.8%,温度最大偏差为 15.0 K, NO_x 质量浓度相对偏差为 10.2%。图 2 中的脱硝入口为水平烟道入口处竖直截面, Y 轴正向代表烟道右侧、负向代表烟道左侧, Z 轴正向代表烟道下侧、负向代表烟道上侧。

在 SCR 系统数值模拟边界条件输入设置中,入口边界设定为速度进口。其中,速度、温度和 NO_x 质量浓度分布按图 2 数据进行设置;出口边界设定为自由出流出口;壁面边界条件设定为绝热壁面。

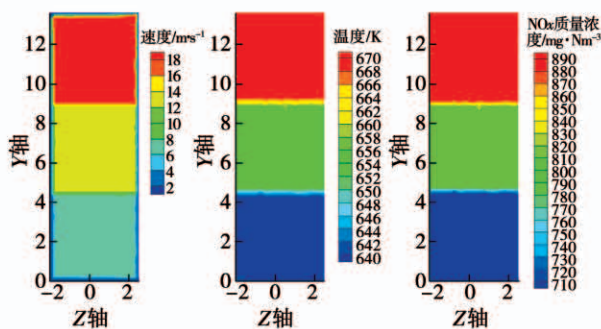


图2 非均匀入口边界

Fig.2 Non-uniform intake flow conditions

1.3 流场优化方案

图 3 为 SCR 系统流场优化方案。其中, X 轴正向代表烟道后墙侧、负向代表烟道前墙侧。在常规流场优化方案中,两处弯头和整流层入口设置导流板 $V1 \sim V3$ 。在常规流场优化方案的基础上,制定分区流场优化方案,脱硝入口水平段布置静态混合器 $S1$,实现脱硝入口段烟气的大范围混合;喷氨格栅后布置静态混合器 $S2$,实现喷氨后烟气的分区混合。本研究中分区混合器将 SCR 烟道分为 3 个分区。

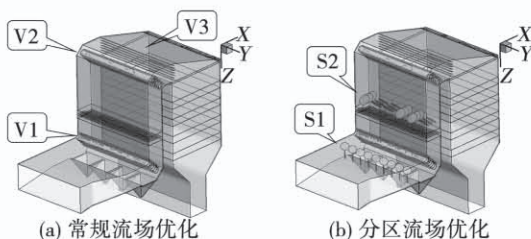


图3 SCR系统流场优化方案

Fig.3 Optimization schemes of the SCR system flow field

1.4 喷氨优化方案

由于非均匀来流条件下喷氨格栅入口流场存在分布不均现象,均匀喷氨难以保证 SCR 系统内氨氮匹配性,故提出一种分区喷氨优化方案。分区喷氨法是根据脱硝分区设置计算每个分区所需喷氨量,设定每个分区均匀分配该分区的喷氨量。需要注意的是,分区喷氨优化建立在分区流场优化的基础上。

分区喷氨时,各分区理论喷氨量计算式为:

$$Q_f^i = V^i \times S^i \times \frac{P^i}{P_0} \times \frac{T_0}{T^i} \times 3600 \quad (7)$$

$$Q_{\text{NH}_3}^i = Q_f^i \times \frac{(C_{\text{NO}_x, \text{in}}^i - C_{\text{NO}_x, \text{out}}^i)}{10^6} \times \frac{17}{46} \quad (8)$$

式中: $Q_{\text{NH}_3}^i$ —分区 i 理论喷氨量, kg/h; Q_i^i —分区 i 烟气体积流量, Nm^3/h ; V^i —分区 i 烟气流速, m/s ; S^i —分区 i 烟道面积, m^2 ; P^i —分区 i 烟气压力, Pa ; T^i —分区 i 烟气温度, K ; P_0 —标况压力, Pa ; T_0 —标况温度, K ; $C_{\text{NO}_x,\text{in}}^i$ —分区 i 脱硝入口 NO_x 质量浓度, mg/Nm^3 ; $C_{\text{NO}_x,\text{out}}^i$ —分区 i 脱硝出口 NO_x 质量浓度, mg/Nm^3 ; i —分区序号。

分区内, 各组喷氨支管均匀喷氨, 其理论喷氨量为:

$$q_{\text{NH}_3}^i = Q_{\text{NH}_3}^i / N^i \quad (9)$$

式中: $q_{\text{NH}_3}^i$ —分区 i 各组喷氨支管理论喷氨量, kg/h ; N^i —分区 i 喷氨支管组数。

2 结果与分析

2.1 常规流场优化结果

在非均匀来流条件下, 对原始 SCR 系统进行数值模拟计算。表 1 为原始 SCR 系统流场参数。其中, 喷氨格栅入口为喷氨格栅上游 0.5 m 处横截面, 首层催化剂入口为首层催化剂上游 0.5 m 处横截面。喷氨格栅入口流场直接影响喷氨均匀性, 首层催化剂入口流场直接影响脱硝反应效率。结果表明: 在无任何导流装置的作用下, 原始 SCR 系统内流场分布十分不均, 基本上各项指标均严重偏离设计要求。

表 1 原始 SCR 系统流场参数

Tab. 1 Flow field parameters of the original SCR system

参数	喷氨格栅入口	首层催化剂入口
平均速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	15.89	4.68
速度相对偏差/%	34.76	3.70
平均温度/K	658.68	657.20
温度最大偏差/K	15.64	13.38
平均 NO_x 质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	821.96	825.00
NO_x 浓度偏差/%	8.96	8.40
平均氨氮摩尔比	—	0.94
氨氮摩尔比相对偏差/%	—	29.44
氨氮摩尔比峰值	—	1.60
系统总压降/ Pa	738	738

图 4 为常规流场优化方案 SCR 系统喷氨格栅入口流场分布, 速度相对偏差为 17.42%, 温度最大

偏差为 15.12 K, NO_x 质量浓度相对偏差为 8.34%。经常规导流后, 喷氨格栅入口速度、温度和 NO_x 质量浓度分布均匀性虽均有所改善, 但依然在左、右侧方向上呈现出明显的分布不均现象, 这将直接影响喷氨均匀性和喷氨调节能力。

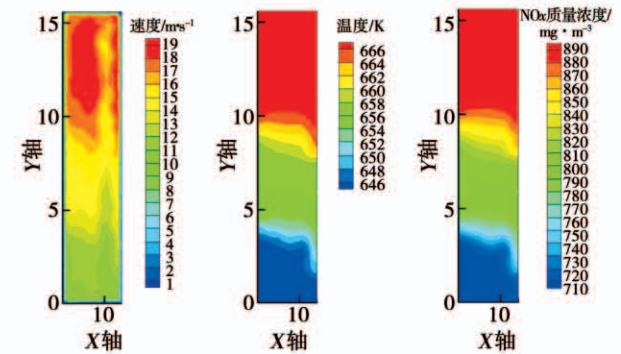


图 4 喷氨格栅入口流场分布 (常规流场优化方案)

Fig.4 Inlet flow field of the AIG (the normal flow field optimization scheme)

图 5 所示的是常规流场优化方案 SCR 系统首层催化剂入口流场分布。

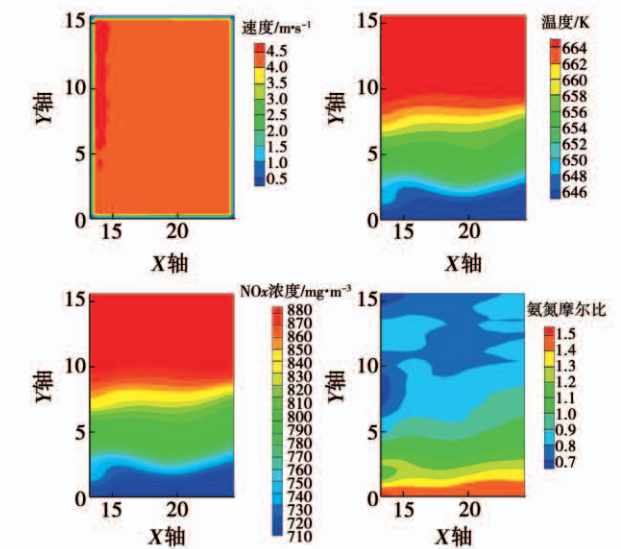


图 5 首层催化剂入口流场分布 (常规流场优化方案)

Fig.5 Inlet flow field of the first catalyst layer (the normal flow field optimization scheme)

速度相对偏差为 1.66%, 温度最大偏差为 12.98 K, NO_x 浓度相对偏差为 7.35%, 氨氮摩尔比相对偏差为 22.77%, 氨氮摩尔比峰值为 1.50。经常规导流后, 首层催化剂层入口烟气速度、温度、 NO_x 质量浓度和氨氮摩尔比均匀性均略有改善, 但

依然无法满足设计要求,这将直接影响脱硝效率和氨逃逸率。温度和 NO_x 质量浓度分布依然存在左侧低、右侧高的现象,而氨氮摩尔比则呈现左侧高、右侧低的现象,这主要是由于均匀喷氨造成的。

常规流场优化方案虽对 SCR 系统流场有明显改善,但远达不到设计要求。在常规流场优化方案中,烟气在进入 SCR 反应器前混合强度较弱。因此,常规流场优化方案配合均匀喷氨无法确保非均匀来流条件下 SCR 系统内流场的均匀性。

2.2 静态混合器对流场的影响

在非均匀来流条件下,通过布置静态混合器以提升 SCR 系统内流场的均匀性。烟气流过静态混合器后会在下游产生涡流,通过设置多个静态混合器可以增强烟气的交叉混合及局部混合,如图 6 所示。

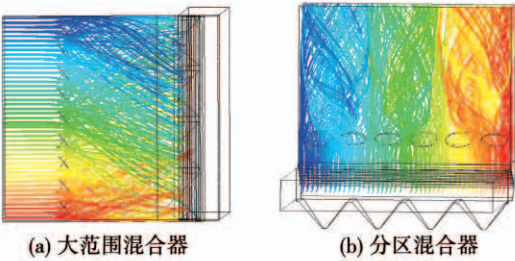


图 6 静态混合器对流场的影响

Fig.6 Influence of the static mixer on the flow field

图 6(a)为在水平烟道内布置大范围混合器后的流线图。在水平烟道内安装上下两层静态混合器,上层烟气向右偏斜,下层烟气向左偏斜,烟气在左右方向上交叉混合,实现烟气大范围交叉混合。此外,大范围静态混合器背面形成的涡流还会加强局部混合。因此,大范围混合器强化了烟气的大范围混合,降低了脱硝入口流场分布偏差。图 6(b)为在竖直烟道内布置分区混合器后的流线图。分区混合器将竖直烟道分成 3 个分区,每个分区内安装一对静态混合器。单个分区内,烟气流过静态混合器后在短距离内形成旋流,保证了分区内烟气的混合均匀性。通过布置分区混合器可以使各分区间烟气基本不相互混合,保证了分区前后良好的对应性。因此,分区混合器提高了各分区内流场分布均匀性,有利于实现分区独立喷氨控制(配合喷氨格栅分区改造)。

2.3 分区流场优化结果

图 7 为分区流场优化方案的 SCR 系统喷氨格栅入口流场分布,速度相对偏差为 10.42%,温度最大偏差为 14.63 K, NO_x 浓度相对偏差为 8.13%。与常规优化方案相比,喷氨格栅入口速度分布有较大改善,速度相对偏差从 17.42% 降至 10.42%,而喷氨格栅入口温度和 NO_x 质量浓度分布则改善不明显。可见,在非均匀来流条件下,大范围混合器对脱硝入口流场的改善作用主要体现在速度分布上。

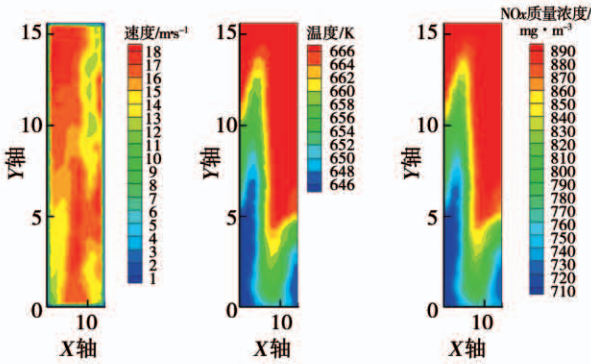


图 7 喷氨格栅入口流场分布(分区流场优化方案)

Fig.7 Inlet flow field of the AIG(the partitioned flow field optimization scheme)

图 8 为分区流场优化方案的 SCR 系统首层催化剂入口流场分布。

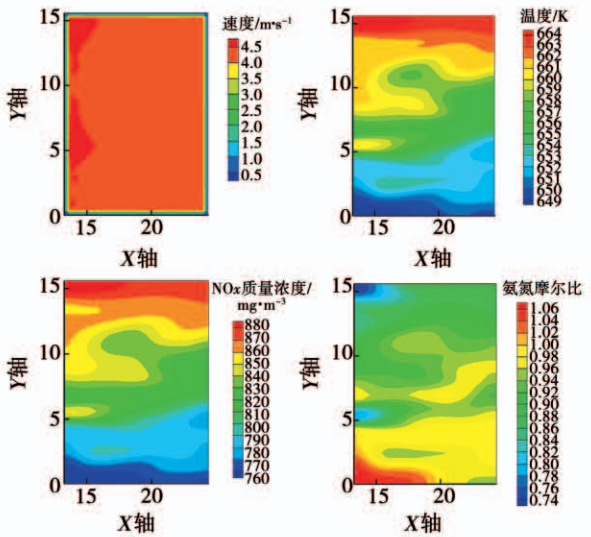


图 8 首层催化剂入口流场分布(分区流场优化方案)

Fig.8 Inlet flow field of the first catalyst layer(the partitioned flow field optimization scheme)

速度相对偏差为1.73%,温度最大偏差为9.01 K, NO_x 质量浓度相对偏差为4.62%,氨氮摩尔比相对偏差5.74%,氨氮摩尔比峰值为1.06。与常规流场优化方案相比,首层催化剂入口速度相对偏差虽略有增大但依然维持在2%以内,温度、 NO_x 质量浓度及氨氮摩尔比分布均有大幅度改善,氨氮摩尔比峰值从1.50降至1.06,这主要归功于分区混合器对喷氨格栅后流场的优化作用。可见,分区混合器可以大幅度改善SCR系统催化剂入口温度、 NO_x 质量浓度和氨氮摩尔比分布。需要注意的是,布置大范围混合器和分区混合器后,SCR系统阻力增加了177 Pa。

2.4 分区流场优化结合分区喷氨优化结果

经分区流场优化后,首层催化剂入口氨氮摩尔比相对偏差为5.74%(>5%),不满足设计要求。为进一步提高SCR系统内氨氮匹配性,在分区流场优化基础上,进行分区喷氨优化。图9所示的是分区喷氨优化原理图。分区混合器将烟道分为分区1~3,分区1包含13组喷氨支管,分区2包含14组喷氨支管,分区3包含13组喷氨支管。利用式(7)~式(9)计算各分区喷氨参数,如表2所示,并将其设置为分区喷氨优化模拟计算的边界条件。由于分区1内烟气平均速度和 NO_x 质量浓度均为最大,其单组喷氨支管喷氨量也为最大。与之相对,分区3内烟气平均速度和 NO_x 浓度均为最小,其单组喷氨支管喷氨量也为最小。结果表明:分区2的喷氨量大于分区1,这主要是因为分区2对应的烟道面积大于分区1。

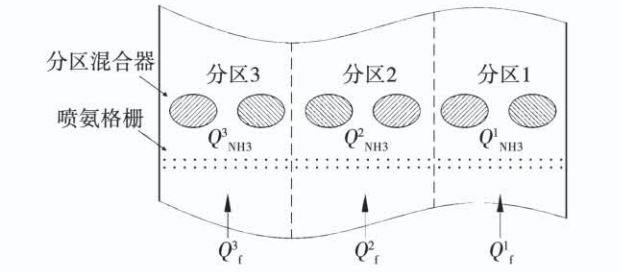


图9 分区喷氨优化示意图

Fig.9 Schematic diagram of the partitioned ammonia injection optimization scheme

表2 喷氨格栅处分区喷氨参数

Tab.2 Partitioned ammonia injection parameters at the AIG

参数	分区1	分区2	分区3
面积/ m^2	16.22	17.47	16.22
平均速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	15.96	15.67	15.20
平均温度/K	667.52	660.85	650.65
平均 NO_x 质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	430.25	408.59	375.36
烟气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	381 499	407 445	372 684
理论喷氨量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	117.52	118.81	99.28
单组支管喷氨量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	9.04	8.49	7.64

表3为SCR系统各方案结果对比。在分区喷氨优化前后,喷氨格栅和首层催化剂入口速度、温度和 NO_x 浓度分布基本维持不变,这主要是因为SCR系统喷氨量仅占主烟气量的0.02%。图10所示的是分区喷氨优化方案的首层催化剂入口氨氮摩尔比分布。经分区喷氨优化后,烟气中氨氮匹配性得到明显改善,首层催化剂入口氨氮摩尔比相对偏差从5.74%降至3.83%,氨氮摩尔比峰值从1.06降至0.98,满足设计要求。

因此,在非均匀来流边界条件下,分区流场优化结合分区喷氨优化可以明显改善SCR系统内部流场分布并提升氨氮匹配性。

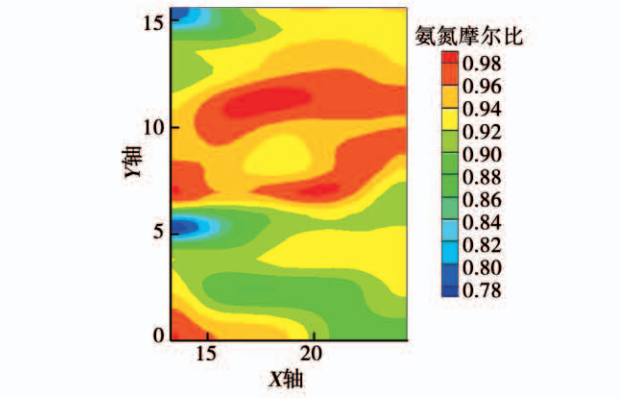


图10 首层催化剂入口氨氮摩尔比分布 (分区喷氨优化方案)

Fig.10 Inlet NH_3/NO_x ratio distribution of the first catalyst layer(the partitioned ammonia injection optimization scheme)

表 3 各优化方案结果

Tab.3 Results of each optimization scheme

项目	原始	常规流场优化	分区流场优化	分区喷氨优化
喷氨格栅入口速度相对偏差/%	34.76	17.42	10.42	10.42
喷氨格栅入口温度最大偏差/K	15.64	15.12	14.63	14.61
喷氨格栅入口 NO _x 质量浓度相对偏差/%	8.96	8.34	8.13	8.12
首层催化剂入口速度相对偏差/%	3.70	1.66	1.73	1.73
首层催化剂入口温度最大偏差/K	13.38	12.98	9.01	8.75
首层催化剂入口 NO _x 质量浓度相对偏差/%	8.40	7.35	4.62	4.61
首层催化剂入口氨氮摩尔比相对偏差/%	29.44	22.77	5.74	3.83
首层催化剂入口氨氮摩尔比峰值	1.60	1.50	1.06	0.98
系统总压降/Pa	738	741	915	915

3 结 论

针对某 650 MW 机组 W 炉 SCR 系统在非均匀来流条件下的静态混合器布置及喷氨优化进行了数值模拟研究,主要结论为:

(1) 定义一种非均匀来流边界以模拟脱硝入口流场在左、右侧方向上分布不均的现象。在非均匀来流边界条件下,基于 SCR 系统常规流场优化结果,提出通过布置静态混合器以改善 SCR 系统内部流场。

(2) 大范围混合器可以明显改善喷氨格栅入口速度分布,分区混合器可以大幅度提升首层催化剂入口温度、NO_x 浓度和氨氮摩尔比分布。经分区流场优化后,喷氨格栅入口速度相对偏差从 17.42% 降至 10.42%,首层催化剂入口氨氮摩尔比相对偏差从 22.77% 降至 5.74%,氨氮摩尔比峰值从 1.50 降至 1.06,但系统阻力增加了 177 Pa。

(3) 在分区流场优化基础上,进行分区喷氨优化,进一步提升了 SCR 系统内氨氮匹配性,首层催化剂入口氨氮摩尔比相对偏差从 5.74% 降至 3.83%,氨氮摩尔比峰值从 1.06 降至 0.98。

(4) 在非均匀来流边界条件下,分区流场优化结合分区喷氨优化使 SCR 系统流场具有更明显的改善效果,有利于提升喷氨格栅调节能力、提高脱硝效率并降低系统氨逃逸率。

参考文献:

[1] CHENG X T,BI X. A review of recent advances in selective catalytic NO_x reduction reactor technologies[J]. Partiouology,2014,16:1-8.

[2] LIU Xing,TAN Hou-zhang,WANG Yi-bin,et al. Low NO_x, combustion and SCR flow field optimization in a low volatile coal fired boiler[J]. Journal of Environmental Management,220:30-35.

[3] MENASHA J,DUNN-RANKIN D,MUZIO L. Ammonium bisulfate formation temperature in a bench-scale single-channel air preheater [J]. Fuel,90(7):2445-2453.

[4] XU Y,ZHANG Y,WANG J,et al. Application of CFD in the optimal design of a SCR-DeNO_x system for a 300 MW coal-fired power plant[J]. Computers & Chemical Engineering,2013,49(FEB.11):50-60.

[5] ZENG H,YUAN J,WANG J. Numerical and experimental investigations on reducing particle accumulation for SCR-de NO_x facilities[J]. Applied Sciences,2019,9(19),4158.

[6] 赵晓军,喻 聪,司凤琪,等. SCR 系统钢梁对催化剂入口烟气流动等参数影响的研究[J]. 热能动力工程,2016,31(3):114-120,151.

ZHAO Xiao-jun,YU Cong,SI Feng-qi,et al. Research on the influences of support beams of SCR system on the parameters such as catalyst inlet flue gas flow[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2016,31(3):114-120,151.

[7] 朱天宇,李德波,方庆艳,等. 燃煤锅炉 SCR 烟气脱硝系统流场优化的数值模拟[J]. 动力工程学报,2015,35(6):481-488,508.

ZHU Tian-yu,LI De-bo,FANG Qing-yan,et al. Flow field optimi-

- zation for SCR system of coal-fired power plants[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(6): 481 - 488, 508.
- [8] 牛彩伟,刘汉涛,张培华,等. 基于流场不均匀度对SCR效率影响的探究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(10): 72 - 78.
- NIU Cai-wei, LIU Han-tao, ZHANG Pei-hua, et al. The effect of uneven flow field on the efficiency of SCR[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(10): 72 - 78.
- [9] 俞斌. SCR系统静态混合器优化布置数值模拟研究[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(12): 60 - 62, 66.
- YU Bin. Numerical simulation study on optimal layout of static mixer in SCR denitration system[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(12): 60 - 62, 66.
- [10] 陈海杰,马务,刘贡祎,等. W火焰锅炉SNCR脱硝及其对SCR入口流场的影响[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 146 - 153.
- CHEN Hai-jie, MA Wu, LIU Gong-yi, et al. Study on SNCR denitration of W-flame boiler and its effect on the flow field of SCR inlet section[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 146 - 153.
- [11] 赵大周,李允超,郑文广,等. 660 MW机组SCR喷氨策略的模拟研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(8): 81 - 86.
- ZHAO Da-zhou, LI Yun-chao, ZHENG Wen-guang, et al. Simulation study on SCR injection strategy of 660 MW unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(8): 81 - 86.
- [12] 吴学智,聂会建,鞠付栋,等. SCR脱硝系统不均匀喷氨方案的数值模拟研究[J]. 电力科技与环保, 2014, 30(5): 26 - 29.
- WU Xue-zhi, NIE Hui-jian, JU Fu-dong, et al. CFD simulation study of nonuniform ammonia injection in SCR denitrification system[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2014, 30(5): 26 - 29.
- [13] LIU G, BAO W, ZHANG W, et al. An intelligent control of NH_3 injection for optimizing the NO_x/NH_3 ratio in SCR system[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(5): 1262 - 1269.
- [14] 高畅,金保昇,张勇,等. 非均匀来流条件下SCR系统精准喷氨策略[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2): 271 - 276.
- GAO Chang, JIN Bao-sheng, ZHANG Yong, et al. Precise ammonia injection strategy in SCR denitrification system based on non-uniform inlet parameters[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2017, 47(2): 271 - 276.
- [15] LIU Z, LI Y, ZHU T, et al. Selective catalytic reduction of NO_x by NH_3 over Mn-promoted $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ catalyst[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(33): 12964 - 12970.

(孙嘉忆 编辑)