

基于CFD计算的脱硝分区喷氨系统调节性能研究

熊锐¹, 胡婷²

(1. 国家电投集团江西电力有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 国家电投集团江西电力有限公司分宜发电厂, 江西 新余 336600)

摘要:采用数值模拟的方法,对不同烟道入口NO_x浓度的SCR系统进行模拟,分析对比了入口NO_x浓度非均匀分布的三种工况下,脱硝系统首层催化剂截面氨氮摩尔比均匀性,以探究不同入口NO_x浓度工况下,分区喷氨系统的调节性能。结果表明,随着喷氨量的增加,氨气与NO_x的混合效果变差,首层催化剂入口截面的氨氮摩尔比分布的均匀性也就越差;分区喷氨系统调节喷氨后,三种工况下,A、B侧首层催化剂入口氨氮摩尔比分布相对偏差均小于5%,分区喷氨系统在不同工况下具有优秀的调节性能,能够提升入口NO_x浓度非均匀分布的不同工况下的氨烟混合效果,提高脱硝性能。

关键词:SCR脱硝系统;分区喷氨系统;非均匀分布;多工况;数值模拟;氨氮摩尔比

中图分类号:X 773 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)04-0058-05

0 引言

氮氧化物作为燃煤发电厂的大气排放污染物之一,是造成雾霾、酸雨、臭氧污染等环境问题的主要原因^[1]。对此,2016年底,我国发布了《电力发展“十三五”规划(2016—2020年)》,限定燃煤电厂NO_x排放浓度在50 mg/m³以内^[2]。目前,国内大多数燃煤电厂的烟气脱硝主要采用SCR、SNCR、SCR+SNCR工艺技术^[3],而SCR脱硝系统利用催化剂还原NO_x,脱硝效率高,在我国火电厂中应用最为广泛^[4]。为了响应国家节能减排政策,全国各地的电厂纷纷进行超低排放改造,SCR脱硝系统需要达到85%甚至90%以上的脱硝效率。由于SCR脱硝系统进出口烟道截面比较大,且竖直烟道通常较短,在导流条件不佳的情况下,存在较大的氨浓度分布不均匀的可能,造成在催化反应区氨氮摩尔比偏离理想值,导致脱硝性能下降。虽然通过增加喷氨量的方式可以提高脱硝效率,但是催化剂在过度喷氨或者喷氨不足的情况下均会影响脱硝性能,会造成局部氨逃逸率高,增加空气预热器堵塞的风险^[5]。

分区喷氨系统是一种新型技术,用于控制脱硝反应器出口NO_x的均匀性,将脱硝入口喷氨区域划分为若干个独立区域,每个区域由单独的喷氨支管控制,

喷氨格栅后方布置了混合器,以实现氨与烟气的混合。该技术在燃煤电厂得到了广泛的使用^[6]。陶莉等^[7]采用数值模拟的方法,研究喷氨格栅喷管所喷NH₃的运动轨迹和分布,发现分区后的出口截面与喷氨支管的对应关系受支管位置与烟道结构的影响而发生不规律的改变;翁骥等^[8]人对安徽芜湖电厂2号炉进行分区喷氨控制系统改造,之后脱硝出口NO_x浓度最大偏差下降,NH₃逃逸率降低;葛铭等^[9]利用模拟和实验的手段研究了分区控制喷氨格栅投运前后脱硝系统流场及喷氨的均匀性,优化后氨逃逸率降低,出口的NO_x浓度分布不均匀度下降;王永桥^[10]提出了一种优化控制SCR系统喷氨量的方法,通过设置分支管路分区控制喷氨量,有效降低了喷氨浓度的偏差。文中以某电厂燃煤发电机组SCR脱硝系统为对象,通过数值模拟的方法,分析对比了入口NO_x浓度非均匀分布的三种工况下,脱硝系统首层催化剂截面氨氮摩尔比均匀性,探究不同入口NO_x浓度工况下,脱硝分区喷氨系统的调节性能。

1 脱硝机理及系统概述

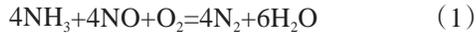
1.1 SCR脱硝反应机理

SCR脱硝系统一般布置在省煤器出口与空气预

收稿日期:2025-03-15

作者简介:熊锐(1987),男,本科,工程师,研究方向为大型火力发电厂热工自动化。

热器之间,烟气从省煤器出口进入SCR系统,在喷氨层与氨气混合,依次通过各催化剂层,氨气和 NO_x 在催化剂中进行选择性催化还原脱硝反应,脱硝后烟气通过SCR系统出口进入空气预热器。SCR脱硝化学反应基本原理如下^[11]:



1.2 SCR脱硝系统中的评价指标

对于烟气系统的设计性能,一般采用流场参数的相对偏差系数(CV值)进行评价,而CV值一般由标准偏差计算得到。不均匀系数是单个截面的测点数据的标准偏差所占平均值的百分量,计算方法如下^[12]:

$$CV=S/\bar{x} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中: S 为标准偏差; \bar{x} 为测点数据的算数平均值; x_i 为测点数据; n 为测点数量。

为了保证SCR系统高效运行,要求SCR首层催化剂入口速度的相对偏差CV值小于15%,速度分布及方向要求与催化剂通道平行,首层催化剂前氨氮摩尔比分布相对偏差小于5%,温度分布相对平均值的最大偏差小于10℃。

2 数值模拟

2.1 数学模型

文中模拟工作在FLUENT上进行,SCR反应器内烟气和 NH_3 的混合与流动满足能量守恒、质量守恒和动量守恒定律。标准k- ϵ (湍流动能-湍流动能耗散率)双方程模型具有较高的稳定性、经济性和计算精度,应用广泛,故湍流模型采用标准k- ϵ 湍流模型^[13]:

能量守恒定律

$$\frac{\partial \rho c_p \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_p \bar{u}_j \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho c_p \bar{u}_j \bar{T}' \right] + S_f + S_R \quad (6)$$

式中: ρ 为密度; c_p 为流体比热容; \bar{T} 为温度的时均值; \bar{u}_j 为速度在 x_j 方向时均值; S_f 为摩擦耗散的热能源项; S_R 为外部热源项。

质量守恒定律

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

式中: \bar{u}_i 为速度在 x_i 方向时均值。

动量守恒定律

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j' \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (8)$$

式中: p 为压力; g_i 为重力加速度分量。

组分守恒定律

$$\frac{\partial (\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho c_s \bar{u}) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho c_s)) + S_s \quad (9)$$

式中: c_s 为组分 s 的质量分数; D_s 为组分 s 的扩散系数; S_s 为组分 s 的源项。

2.2 模拟对象

根据某电厂660 MW机组SCR烟道图纸进行1:1三维建模,范围包含整个SCR脱硝系统烟道以及内部的导流板、扰流装置和喷氨装置等。由于内部的支撑结构等对流场的影响较小,因此在保证内部流场不受影响的情况下,去除内部支撑结构,只保留主要部件,最终模型如图1所示。

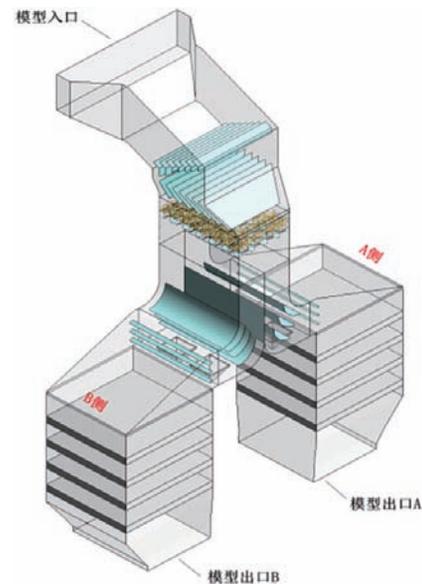


图1 SCR烟气脱硝系统结构示意图

图2为A侧分区喷氨系统的示意图。由于烟道有两个出口,所以在喷氨层将烟道分为与出口A、B侧对应的两部分,并分别布置分区喷氨系统,单侧分区喷氨系统在宽度方向和深度方向按8×6分区布置,喷氨量在各分区均由单独的阀门控制。系统运行期间,可根据烟气波动实际情况,灵活调整各分区阀门开度大小,以适应变化的流场。

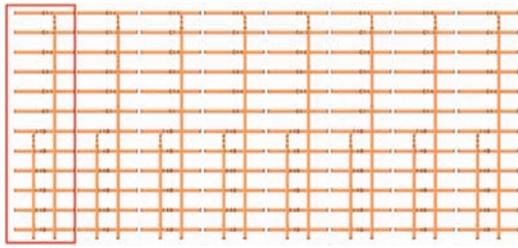


图2 分区喷氨系统

2.3 网格划分

采用ICEM软件,划分SCR脱硝系统烟道的网格,采用结构化网格,并对系统壁面、烟道内的导流板进行附面层加密处理。对于整流格栅、催化剂层,如果按照实际模型划分网格,网格数量庞大,需要消耗大量的计算资源,所以本次模拟将整流格栅和催化剂层按多孔介质划分网格。经网格无关性验证后,最终网格数约为1 127万。

2.4 边界条件

本研究将烟道入口分为两段,分别与催化剂A、B侧对应,模型入口定义为速度入口边界,反应器出口定义为压力出口边界,固体壁面和导流板均设为wall,整流格栅和催化剂层设置为多孔介质,烟气物性参数如表1所示,边界条件如表2所示。

表1 烟气物性参数

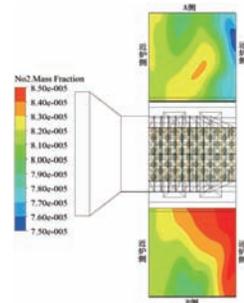
名称	数值
温度/ $^{\circ}\text{C}$	390
密度/ (kg/m^3)	0.535
定压比热容/ $(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	1156
换热系数/ $(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	5.614×10^{-2}
动力粘度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	3.162×10^{-5}

表2 边界条件参数

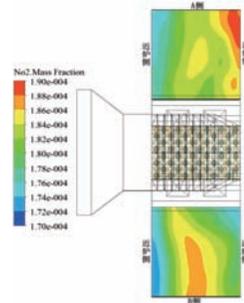
名称	工况1	工况2	工况3
烟道入口速度/ (m/s)	12.39	12.39	12.39
烟道入口当量直径/ (mm)	7.84	7.84	7.84
烟道出口当量直径/ (mm)	10.26	10.26	10.26
烟道入口 NO_x 平均浓度/ (mg/Nm^3)	109	242.8	283.1
烟道入口A侧 NO_x 偏差/ $(\%)$	11	11.4	10
烟道入口B侧 NO_x 偏差/ $(\%)$	12.6	10.4	10
喷氨入口速度/ (m/s)	16.15	16.327	16.38
喷氨入口氨气质量占比/ $(\%)$	0.005	0.012	0.014
喷氨入口直径/ (mm)	65	65	65

3 结果与讨论

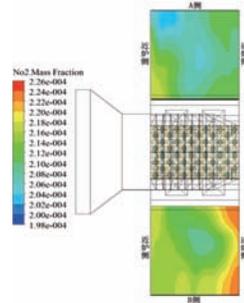
三种工况下,首层催化剂入口 NO_x 分布如图3所示,可以发现由于三种工况下,烟道入口 NO_x 浓度都呈非均匀分布,脱硝烟道结构紧凑,烟道截面变化大,转弯多,竖直烟道短,竖直烟道后连接两台反应器,混合效果不理想,导致三种工况下,A、B两侧首层催化剂 NO_x 的分布很不均匀,均存在较明显的高浓度和低浓度区域。



(a) 工况1氨氮摩尔比分布



(b) 工况2氨氮摩尔比分布



(c) 工况3氨氮摩尔比分布

图3 首层催化剂入口 NO_x 分布

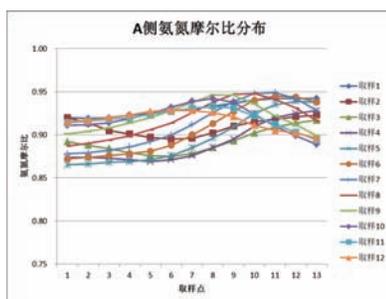
从表2得知,工况1:烟道入口A、B侧的 NO_x 浓度不均匀度分别为11%、12.6%;工况2:烟道入口A、B侧的 NO_x 浓度不均匀度分别为11.4%、10.4%,;工况3:烟道入口A、B侧的 NO_x 浓度不均匀度都为10%。从表3得知,工况1:首层催化剂入口A、B侧的 NO_x 浓度不均匀度分别为11.3%、12.8%;工况2:首层催化剂入口A、B侧的 NO_x 浓度不均匀度分别为11.2%、10.6%;工况3:首层催化剂入口A、B侧的 NO_x 浓度不均匀度分别为9.6%、10.4%。可以发现,首层催化剂入口 NO_x 浓度分布不均匀度受烟道入口 NO_x 浓度不均匀度的影响,烟道入口 NO_x 浓度分布越不均匀,首层催化剂入口 NO_x 分布的均匀性就越差。在烟道入口 NO_x 非均匀分布的工况下,如果采用平均化喷氨装置,氨烟难以均匀混合,容易造成局部氨逃逸过高或局部 NO_x 排放超标,脱硝性能降低。采用分区喷氨系统,可

根据烟气波动实际情况,灵活调整各分区阀门开度大小,以适应变化的流场,保证氨烟能够充分混合。

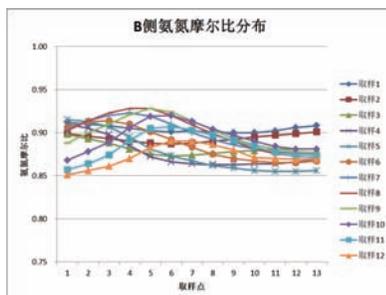
表3 SCR脱硝系统模拟结果

参数	工况1	工况2	工况3
A侧首层催化剂入口氨氮摩尔比Cv值(%)	2.48	3.35	3.73
A侧首层催化剂入口NO _x 偏差(%)	11.3	11.2	9.6
A侧首层催化剂入口氨氮摩尔比平均值	0.91	0.9	0.91
B侧首层催化剂入口氨氮摩尔比Cv值(%)	2.11	2.93	4.53
B侧首层催化剂入口NO _x 偏差(%)	12.8	10.6	10.4
B侧首层催化剂入口氨氮摩尔比平均值	0.89	0.9	0.89

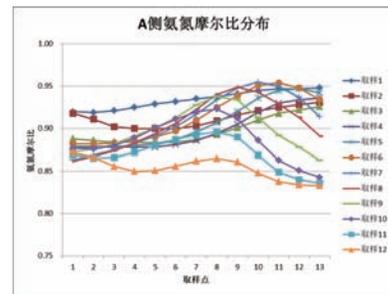
表3为SCR脱硝系统模拟结果,工况1:A、B侧首层催化剂入口氨氮摩尔比平均值分别为0.91和0.89;工况2:A、B侧首层催化剂入口氨氮摩尔比平均值分别为0.9和0.9;工况3:A、B侧首层催化剂入口氨氮摩尔比平均值分别为0.91和0.89。三种工况下,A、B侧首层催化剂入口氨氮摩尔比平均值相差不大。如图4所示,在首层催化剂入口截面宽度方向上布置12条线,每条线上布置13个点取样的氨氮摩尔比。工况1喷氨量最小,首层催化剂入口氨氮摩尔比分布较为均匀,取样点氨氮摩尔比值也没有太大波动;工况2喷氨量增加,首层催化剂入口取样点氨氮摩尔比值变化波动变大,氨氮摩尔比分布的均匀性变差;工况3喷氨量最大,首层催化剂入口取样点的氨氮摩尔比值变化幅度最大,氨氮摩尔比分布的均匀性最差。结合表3可以发现,随着喷氨量的增加,氨气与NO_x的混合效果变差,首层催化剂入口截面的氨氮摩尔比分布的均匀性也就越差。



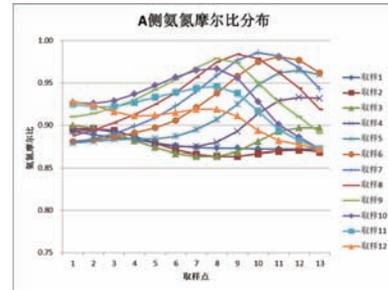
(a) 工况1 A侧氨氮摩尔比分布



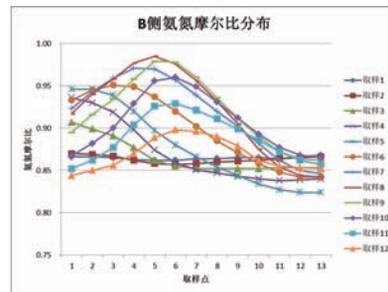
(b) 工况1 B侧氨氮摩尔比分布



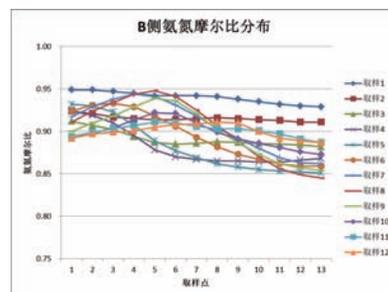
(c) 工况2 A侧氨氮摩尔比分布



(d) 工况2 B侧氨氮摩尔比分布



(e) 工况3 A侧氨氮摩尔比分布



(f) 工况3 B侧氨氮摩尔比分布

图4 首层催化剂入口取样点氨氮摩尔比值

三种工况喷氨调节后,首层催化剂入口氨氮摩尔比分布如图5所示,可以发现三种工况下首层催化剂入口氨氮摩尔比分布较为均匀,都没有明显的高氨氮摩尔比和低氨氮摩尔比区域。从表3得知,工况1下,A、B侧首层催化剂入口的氨氮摩尔比分布CV值分别为2.48%、2.11%;工况2下,A、B侧首层催化剂入口的氨氮摩尔比分布CV值分别为3.35%、2.93%;工况3下,A、B侧首层催化剂入口的氨氮摩尔比分布比CV值分别为3.73%、4.53%,均满足首层催化剂前氨氮摩尔比分布CV值小

于5%的要求,氨气和烟气混合效果良好,氨氮摩尔比分布均匀,分区喷氨系统在入口NO_x浓度非均匀分布的不同工况下具有优秀的调节性能,可以消除氨逃逸率过高的局部区域,提高脱硝性能。

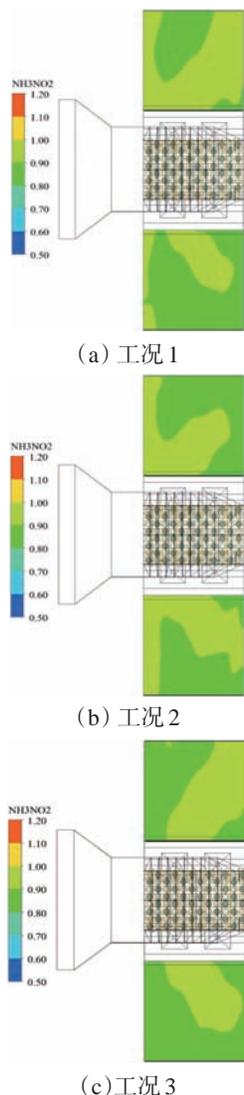


图5 首层催化剂入口氨氮摩尔比分布

4 结语

采用FLUENT软件,对某电厂燃煤发电机组SCR脱硝系统进行数值模拟,研究非均匀分布的入口NO_x浓度在不同工况下,脱硝分区喷氨系统的调节性能,模拟结果表明:

1) 首层催化剂入口NO_x浓度分布不均匀度受烟道入口NO_x浓度不均匀度的影响,烟道入口NO_x浓度

分布越不均匀,首层催化剂入口NO_x分布的均匀性就越差。采用分区喷氨系统,可根据烟气波动实际情况,灵活调整各分区阀门开度大小,以适应变化的流场,保证氨气和烟气能够充分混合。

2) 随着喷氨量的增加,氨气与NO_x的混合效果变差,首层催化剂入口截面的氨氮摩尔比分布的均匀性变差。

3) 分区喷氨系统调节喷氨后,三种工况下,A、B侧首层催化剂入口氨氮摩尔比分布CV值均满足首层催化剂前氨氮摩尔比分布CV值小于5%的要求,分区喷氨系统能够提升入口NO_x浓度非均匀分布的不同工况下的氨气和烟气混合效果,提高脱硝性能。

参考文献:

- [1] 李国亮. 氮氧化物对环境的危害及污染控制技术[J]. 山西化工, 2019, 39(05): 123-124, 135.
- [2] 《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(01): 32.
- [3] 周永飞. 燃煤电厂中的氮氧化物排放控制技术分析[J]. 集成电路应用, 2023, 40(02): 204-205.
- [4] 张道军, 马子然, 孙琦, 等. 选择催化还原(SCR)反应机理研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(04): 1611-1623.
- [5] 高畅, 金保昇, 张勇, 等. 非均匀入口条件下SCR脱硝系统精准喷氨策略[J]. 东南大学学报, 2017, 47(02): 271-276.
- [6] 徐波, 陈锋, 孙漪清, 等. 燃煤电厂SCR烟气脱硝喷氨静态混合技术研究[J]. 能源与节能, 2017(10): 86-87, 110.
- [7] 陶莉, 肖育军. SCR区域喷氨的NH₃分布与均匀性调整[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(04): 663-669.
- [8] 翁骥, 王铮, 李小海, 等. SCR脱硝系统分区控制式喷氨格栅的优化[J]. 环境工程学报, 2017, 11(05): 2915-2919.
- [9] 葛铭, 姚宣, 刘柱, 等. 分区控制式喷氨格栅脱硝系统流场及喷氨均匀性研究[J]. 煤炭转化, 2022, 45(03): 95-102.
- [10] 王永桥. 选择性还原脱硝系统喷氨量优化控制方法[J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(08): 15-16.
- [11] 高小涛. 选择性催化还原脱硝技术在电站锅炉上的应用[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(04): 60-62.
- [12] 国家能源局. 燃煤电厂SCR烟气脱硝流场模拟技术规范DL/T 1418—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [13] 张楚城. 基于数值模拟方法的SCR脱硝流场优化控制技术应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.