

NO_x非均匀分布条件下脱硝精细化喷氨的应用研究

孙 梁¹ 冯 波¹ 任 旻²

1. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃一分公司 宁夏 银川 750411

2. 烟台龙源电力技术股份有限公司 山东 烟台 264006

摘 要:为解决燃煤电厂完成超低排放改造后出现的NO_x局部排放超标、氨逃逸量偏高等问题,采用FLUENT软件对精细化喷氨改造后的SCR脱硝系统进行数值模拟,以探究精细化喷氨技术在NO_x浓度非均匀分布的不同工况下的喷氨调节性能。结果表明:当烟道入口的NO_x浓度是非均匀分布时,首层催化剂NO_x浓度与烟道入口NO_x浓度的分布趋势一致,若仍采用平均化喷氨技术,易导致局部氨逃逸偏高;而采用精细化喷氨技术,可根据NO_x分布的实际情况,灵活调整各分区阀门开度大小,适应NO_x非均匀分布的流场,保证氨烟能够充分混合;精细化喷氨技术在三种不同的工况下均具有优秀的喷氨调节性能,能够保证氨烟良好的混合效果和首层催化剂入口氨氮摩尔比分布的均匀性,可以有效提高不同工况下的脱硝性能。

关键词: SCR脱硝系统;精细化喷氨;脱硝效率;氨逃逸;数值模拟;氨氮摩尔比

引言

为了控制我国电力行业的NO_x排放,在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50mg/m³以内^[1]。随着电厂超低排放改造的进行,SCR脱硝系统的性能提升改造也面临着更大的考验,SCR脱硝系统的脱硝效率需要达到85%甚至90%以上^[2],虽然通过增加喷氨量的方式可以提高脱硝效率,但会造成局部的氨逃逸率过高,增加空预器堵塞的风险^[3]。另外,燃煤锅炉内部的结构复杂,燃烧流场极其不稳定,省煤器出口的各烟气参数都不是均匀分布的,其分布情况还会随着工况变化,平均化的喷氨系统难以保证氨气和烟气的混合效果^[4]。而分区喷氨系统简称精细化喷氨,是一种新型的喷氨技术,用于提高脱硝系统出口NO_x的均匀性,它将烟道内的喷氨区域划分为若干个独立区域,每个分区由单独的喷氨支管控制,喷氨系统的下游还会布置混合器,以保证氨烟的混合效果,该技术在燃煤电厂得到了广泛的使用^[5]。

近年来,国内外学者对精细化喷氨技术进行了大量的理论和实践研究。田勇^[6]等采用CFD方法对精细化喷氨改造的脱硝系统进行导流优化,大大提高了喷氨分区对应性和氨气分布的均匀性。谢晔^[7]等人在660MW机组上引入精细化喷氨技术,有效改善了系统的脱硝性能,降低了空预器阻力,提高了SCR出口NO_x浓度分布的均匀性。翁骥^[8]等人对安徽芜湖电厂2#炉进行精细化喷氨改造,改造后脱硝出口NO_x浓度最大偏差下降,NH₃逃逸

率降低。游联欢^[9]等人对660MW机组进行精细化喷氨改造,提高了出口NO_x浓度的均匀性,降低了机组氨耗量和氨逃逸,实现脱硝系统超低稳定排放。葛铭^[10]等利用模拟和实验的手段研究了精细化控制喷氨格栅投运前后脱硝系统流场及喷氨的均匀性,发现优化后氨逃逸率减少,出口的NO_x浓度分布相对偏差下降。王明星^[11]等人以精细化喷氨技术代替线性控制式喷氨系统,脱硝系统的氨逃逸率降低,NO_x脱除率提高,出口NO_x浓度达到排放标准。综合已有的研究成果发现,大多数研究都采用了均匀入口的边界条件,但关于非均匀边界条件的研究却相对较少。本研究以实际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NO_x浓度非均匀分布的三种工况脱硝系统首层催化剂截面氨氮摩尔比均匀性,探究不同NO_x浓度工况下精细化喷氨技术的调节性能。

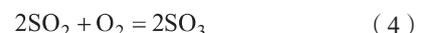
1 反应机理及评价指标

1.1 选择性催化还原反应机理

选择性催化还原技术是指在催化剂(V₂O₅/W₂O₃)存在的条件下,烟气温度在300-400℃之间,以NH₃等为还原剂,将烟气中的NO_x还原成N₂和H₂O^[12],原理如下:



当NH₃在催化剂层中反应时间不足导致氨逃逸过量时,还会发生式(4)、(5)中的副反应,生成硫酸氢氨,其与烟气中的飞灰是导致空预器堵塞的重要原因之一。



作者简介: 孙梁(1987-),男,工程师,硕士研究生,研究方向为化工厂动力车间生产工艺管理



1.2 SCR脱硝系统中的评价指标

流场和氨气浓度的均匀性是影响脱硝效率的关键因素，根据美国RMS标准，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。CV值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^[13]：

$$CV = S / \bar{x} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

其中， \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， S 为标准偏差。

SCR脱硝系统内部流场和速度场的评价指标如表1

所示^[13]。

表1 SCR脱硝系统设计标准

参数	要求
首层催化剂入口截面流速偏差CV值	≤ 15%
首层催化剂入口截面氨氮摩尔比偏差CV值	≤ 5%

2 数值模拟

2.1 数学模型

本文模拟工作在FLUENT上进行，根据相关文献，SCR反应器内烟气和NH₃的混合与流动满足能量守恒、质量守恒、动量守恒定律。标准k-ε（湍流动能-湍流能耗散率）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^[14]：

能量守恒定律：

$$\frac{\partial \rho c_p \bar{T}}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_p \overline{u_j T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho c_p \overline{u_j T'} \right] + S_f + S_R \quad (8)$$

质量守恒定律：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

动量守恒定律：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u_i u_j \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (10)$$

组分守恒定律

$$\frac{\partial (\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho u c_s) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho c_s)) + S_s \quad (11)$$

2.2 模拟对象

本次模拟根据某电厂460t/h煤粉锅炉SCR烟道图纸进行1:1三维建模，由于内部的支撑结构、导流板和喷氨装置的厚度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，忽略内部支撑结构、导流板和喷氨装置的厚度，保留主要部件，最终模型如图1。

图2为分区喷氨系统的示意图，分区喷氨系统在宽度方向和深度方向按6×3分区布置，喷氨量由各分区均的阀门单独控制，脱硝系统运行时，可以根据反馈的出口NO_x浓度分布情况，灵活调整各分区的喷氨量，以提高系统的脱硝效率。

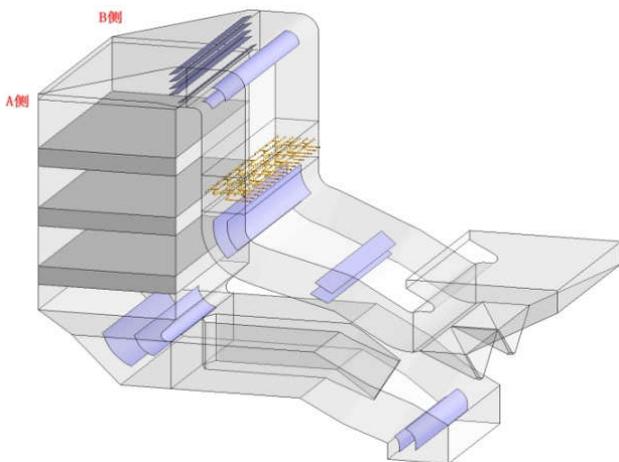


图1 SCR烟气脱硝系统结构示意图

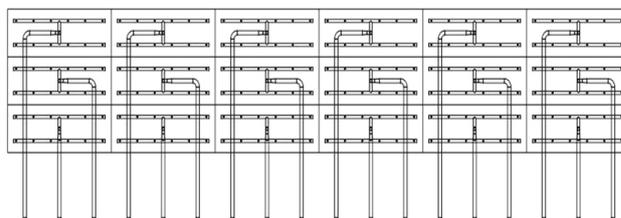


图2 分区喷氨系统

2.3 网格划分

采用ICEM软件划分SCR脱硝系统烟道的网格，网格划分采用结构化网格，并对系统壁面、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1100万。

2.4 边界条件

本研究将烟道入口即省煤器出口定义为速度边界，速度值由省煤器出口的烟气量计算得到；烟道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，按实际压降给定阻力系数。氨烟物性参数如表2所示，边界条件如表3所示。

表2 烟物性参数

名称	单位	数值
温度	°C	363
密度	kg/m ³	0.557
定压比热容	J/(kg.K)	1147
换热系数	W/(m.K)	5.383×10 ⁻²
动力粘度	Pa·s	3.065×10 ⁻⁵

表3 边界条件参数

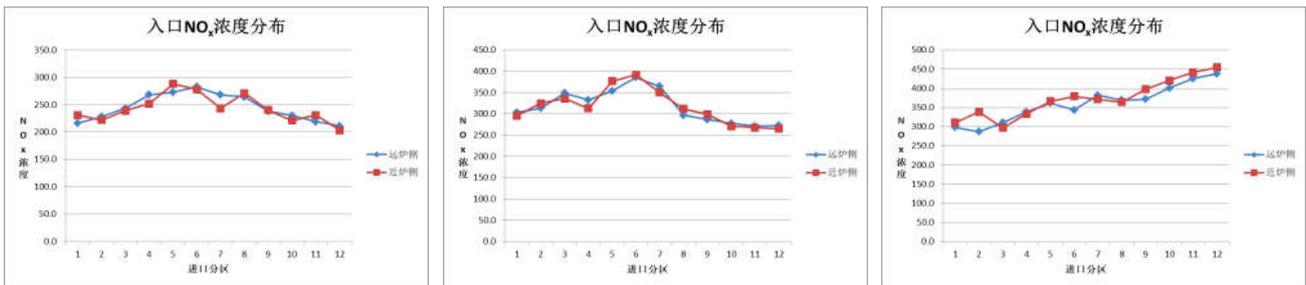
名称	工况1	工况2	工况3
烟道速度 (m/s)	3.52	3.52	3.52
烟道当量直径 (m)	8.82	8.82	8.82
烟道出口当量直径(m)	4.5	4.5	4.5

续表:

名称	工况1	工况2	工况3
烟道NO _x 平均浓度 (mg/Nm ³)	244	317	367
烟道NO _x 偏差	10%	12.2%	13.1%
喷氨速度 (m/s)	15.009	15.082	15.132
喷氨氮气质量占比	0.01	0.013	0.015
喷氨直径(mm)	65	65	65

3 结果与讨论

图3为烟道入口在深度方向分为两个分区，在宽度方向从B侧到A侧依次分为12个分区的NO_x浓度分布，三种工况烟道入口NO_x浓度都是非均匀分布的。工况11-5入口分区的NO_x浓度是逐渐增加的，5-12分区的NO_x浓度是逐渐减少的，A侧入口分区的NO_x浓度略低于B侧分区；工况21-6入口分区的NO_x浓度呈上升趋势，6-9入口分区的NO_x浓度大幅度下降，9-12入口分区的NO_x浓度下降趋势缓慢，A侧分区的烟道入口NO_x浓度明显低于B侧分区；工况31-12入口分区的NO_x浓度整体呈上升趋势。

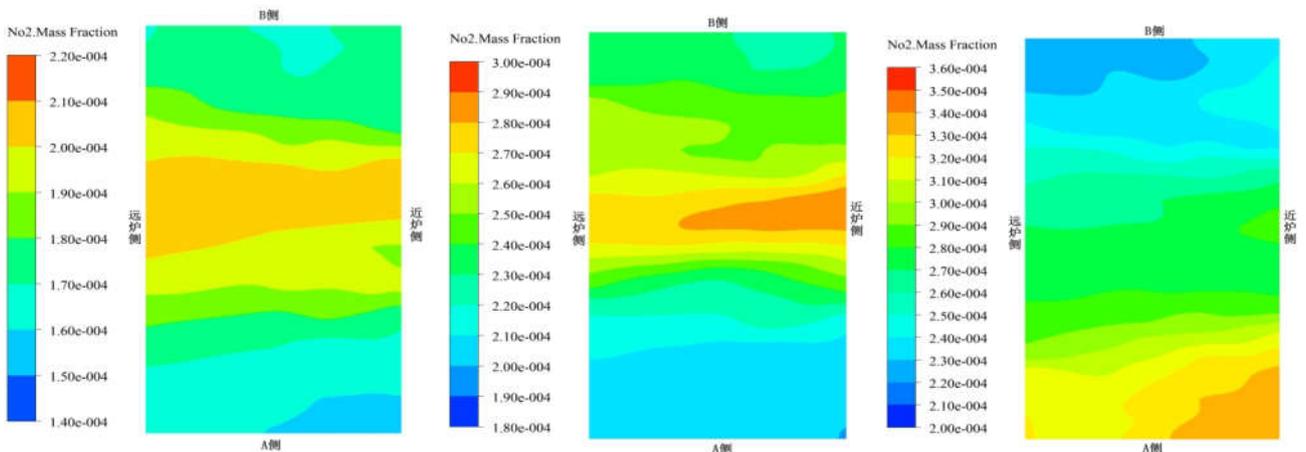


(a) 工况1

(b) 工况2

(c) 工况3

图3 烟道入口NO_x分布



(a) 工况1

(b) 工况2

(c) 工况3

图4 首层催化剂入口NO_x分布

三种工况的首层催化剂入口NO_x分布如图4所示，工况1首层催化剂NO_x浓度从B侧到A侧是先增加后减小的，

A侧首层催化剂入口截面的NO_x浓度略低于B侧；工况2首层催化剂入口截面的NO_x浓度从B侧到A侧也是先增加后减小的，烟道中间区域的NO_x浓度存在明显的变化，B侧首层催化剂入口截面的NO_x浓度明显低于A侧；工况3首层催化剂入口截面的NO_x浓度从B侧到A侧是逐步增加

的。可以发现三种工况首层催化剂入口截面的NO_x浓度分布趋势均与烟道入口NO_x浓度的分布趋势一致。在上述三种工况下，如果仍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。

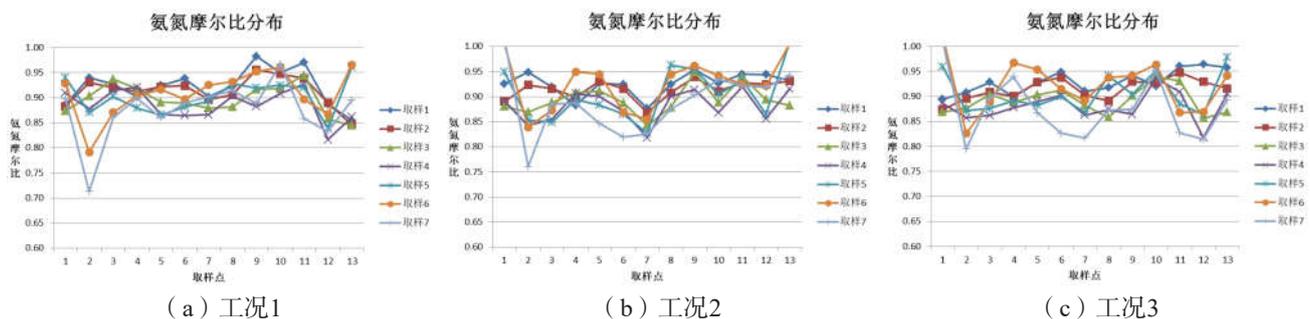


图5 首层催化剂入口取样点氨氮摩尔比值

表4为SCR脱硝系统模拟结果，三种工况A、B侧首层催化剂氨氮摩尔比平均值均为0.9。图5为首层催化剂入口截面在深度方向上布置7条线，每条线上布置13个点取样的氨氮摩尔比值，工况1取样点的首层催化剂氨氮摩尔比值在0.9附近波动，有少数取样点的波动幅度较大；工况2、工况3取样点的首层催化剂氨氮摩尔比值的波动幅度明显大于工况1，但并未出现氨氮摩尔比值过大和过小的取样点，氨烟混合效果良好。采用精细化喷氨技术，可以根据NO_x分布的实际情况，调整对应分区阀门开度发大小，以适应NO_x非均匀分布的流场，保证氨烟能够充分混合，消除局部氨逃逸量过高的区域。

布的均匀性不同，但是经过分区喷氨系统调节后，三种工况下首层催化剂氨氮摩尔比分布都比较均匀，不存在明显的高氨氮摩尔比和低氨氮摩尔比区域，喷氨系统在三种工况下的调节性能良好。从表4得知，工况1首层催化剂入口的氨氮摩尔比分布CV值为4.51%，工况2首层催化剂入口的氨氮摩尔比分布CV值为4.88%，工况3首层催化剂入口的氨氮摩尔比分布CV值为4.69%，均满足首层催化剂入口氨氮摩尔比分布CV值小于5%的要求，精细化喷氨技术在这三种工况下具有优秀的调节性能，保证了氨烟良好的混合效果和首层催化剂入口氨氮摩尔比分布的均匀性，有效消除了氨逃逸率过高的局部区域，提高脱硝性能。

三种工况喷氨调节后首层催化剂氨氮摩尔比分布如图6所示。虽然三种工况烟道入口NO_x浓度和NO_x浓度分

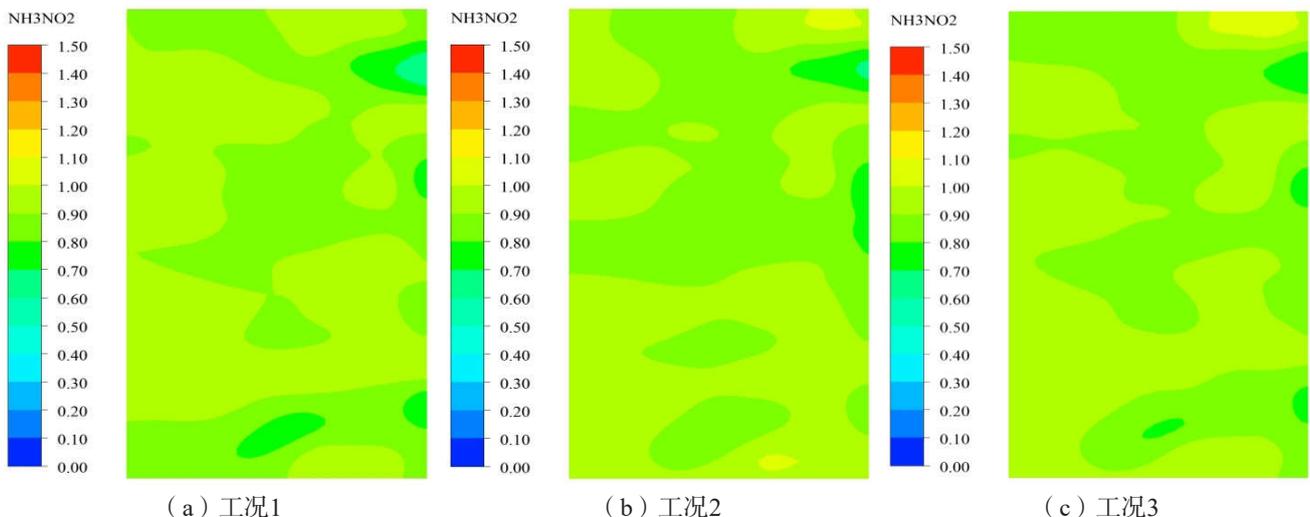


图6 首层催化剂氨氮摩尔比分布

表4 SCR脱硝系统模拟结果

参数	工况1	工况2	工况3
首层催化剂氨氮摩尔比Cv值	4.51%	4.88%	4.69%
首层催化剂NO _x 相对偏差	10.1%	12.4%	13.2%
首层催化剂氨氮摩尔比平均值	0.9	0.9	0.9

4 结论

(1) 当烟道入口的NO_x浓度是非均匀分布时, 首层催化剂入口NO_x浓度分布的均匀性受烟道入口NO_x浓度相对偏差值的影响, 首层催化剂NO_x浓度与烟道入口NO_x浓度的分布趋势一致, 如果仍采用平均化喷氨技术, 易导致局部氨逃逸偏高。

(2) 当烟道入口的NO_x浓度是非均匀分布时, 采用精细化喷氨技术, 可根据NO_x分布的实际情况, 灵活调整各分区阀门开度大小, 以适应NO_x非均匀分布的流场, 可以保证氨烟能够充分混合, 防止出现局部氨逃逸量过高的区域。

(3) 精细化喷氨技术在不同的工况下均具有优秀的调节性能, 能够保证不同工况下氨烟的混合效果和首层催化剂入口氨氮摩尔比分布的均匀性, 可以有效提高不同工况下的脱硝性能。

参考文献

- [1] 《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.
- [2] 何彦鹏. 燃煤电厂脱硝优化系统的研究[J]. 电工技术, 2021, (16):163-164.
- [3] 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.

[4] 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(06):78-85.

[5] 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.

[6] 田勇, 王力康, 胡成, 等. SCR分区喷氨导流优化设计及效果评估[J]. 能源与环境, 2023, (03):87-89+115.

[7] 谢晔, 王宏铭, 马丽媛, 等. 660MW机组脱硝SCR分区喷氨控制技术改造[J]. 宁夏电力, 2022, (02):66-70.

[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] 游联欢, 刘佳豪. 火电机组脱硝系统智能分区喷氨优化控制研究[A]. 中国电力技术市场协会. 2022年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集[C]. 中国电力技术市场协会:中国电力技术市场协会, 2022:7.

[10] 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):

[11] 王明星, 李欣, 李勇, 等. 分区控氨技术在烟气NO_x超低排放中的应用[J]. 化工环保, 2021, 41(04):524-528.

[12] 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(4):60-62.

[13] 梁胜莹. 锅炉SCR脱硝系统内流动与化学反应模拟研究[D]. 华北电力大学, 2020.

[14] 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]. 浙江大学, 2021.