

基于CFD计算分析的脱硝进出口分区对应性研究

祁光飞¹ 柴盛¹ 刘亚军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: 针对SCR系统喷氨调节工作耗时长、精度差和效率低等问题,利用数值模拟技术建立SCR系统数值模型,研究脱硝系统进口各个分区与出口截面分区的对应关系,为喷氨调节工作提供理论指导。结果表明:脱硝系统的进出口分区的对应关系受烟道内部的结构影响,烟道内部的收缩段、拐角和合并段,会使氨气出现偏移,导致进出口分区对应性变差;脱硝系统的进出口分区的对应关系沿烟道中心线对称相似;烟道两侧的壁面的阻挡作用抵消了氨气在分区1和分区6壁面侧的扩散效应,只有少量氨气扩散至其他分区。分区1和分区6的分区对应性最佳,而其余进口分区的氨气扩散效果好,对应关系则相对较差。

关键词: SCR脱硝系统; 喷氨系统; 对应性; 浓度分布; 数值模拟

引言

随着燃煤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^[1],SCR脱硝系统的脱硝效率需要达到85%甚至90%以上,由于烟道空间受限,脱硝烟道内部存在连续的90°和180°的弯道,使得烟气在喷氨区域的均匀性较差,如果仍采用平均化的喷氨方式,难以保证氨气和烟气的混合效果,易导致局部区域氨逃逸率偏高^[2]。因此,我国电厂多采用SCR出口烟道的在线监测系统,在出口布置多点监测点位取样,对出口的烟气NO_x浓度进行监测,并将取样的NO_x浓度反馈给分区喷氨控制系统,灵活调整对应分区的喷氨量,以保证氨气和烟气的混合效果,消除出口NO_x浓度排放超标的区域^[3]。

由于脱硝烟道存在拐角、变截面以及弯道,结构复杂,使得喷氨支管阀门与出口NO_x浓度的对应关系难以确定,实际工作中存在很大的盲目性,喷氨调节工作耗时长、精度差、效率低^[4]。因此,国内外学者为提高SCR系统的脱硝性能,针对喷氨系统优化调整进行了大量的理论和实践研究。于子龙^[5]等人提出了一套SCR智能喷氨分区控制系统,改造后喷氨总量明显降低,NO_x控制幅度非常平稳,节氨效果明显。田勇^[6]等采用CFD方法对分区喷氨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。陶莉^[7]等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。陆伟^[8]等采用CFD方法研

究喷氨喷管入口与系统出口的对应关系,发现喷管入口与系统出口总体上具有良好的对应关系,对应性受烟道的结构的影响,良好的对应性可以有效地指导喷氨支管阀门的针对性调整。胡劲逸^[9]利用FLUENT软件研究了分布式喷氨系统各喷口的喷氨量变化时,相应的SCR催化剂入口的氨浓度变化规律,为喷氨调节提供理论依据。本研究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,分析脱硝系统出口各个分区氨气的分布规律,研究进口分区与出口截面分区的对应性,为喷氨调节工作提供理论指导。

1 数值模拟

1.1 数学模型

SCR脱硝系统在实际工作时涉及复杂的传热传质、射入的还原剂与烟气湍流混合以及化学反应等过程,因此可以根据相关文献,引入以下合理假设^[10]:

- 1) 忽略烟道内部管撑、梁以及导流板等部件的厚度对流场的影响;
- 2) 假设流动过程为定场流动;
- 3) 忽略系统温度变化和漏风量影响,假设脱硝系统壁面绝热;
- 4) 只考虑流场分布和烟气与氨气的混合情况,忽略化学反应;
- 5) 采用多孔介质模型处理复杂的催化剂层,根据实际压降设置阻力系数^[11]。

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

作者简介: 祁光飞(1989-),男,本科,工程师,研究方向为电厂锅炉运行

度,应用广泛,故湍流模型采用标准k-ε湍流模型^[12]:

能量守恒定律:

$$\frac{\partial \rho c_p \bar{T}}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_p \overline{u_j T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho c_p \overline{u_j' T'} \right] + S_f + S_R \quad (1)$$

质量守恒定律:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量守恒定律:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u_i u_j \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (3)$$

组分守恒定律

$$\frac{\partial (\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho u c_s) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho c_s)) + S_s \quad (4)$$

1.2 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,脱硝系统位于省煤器出口与空预器进口之间,模型如图1所示,主要包含SCR脱硝系统烟道以及内部的导流板、扰流装置等,忽略烟道内部管撑、梁

以及导流板等部件的厚度对流场的影响。如图2和图3所示,将脱硝系统进出口划分为6个对应的分区。

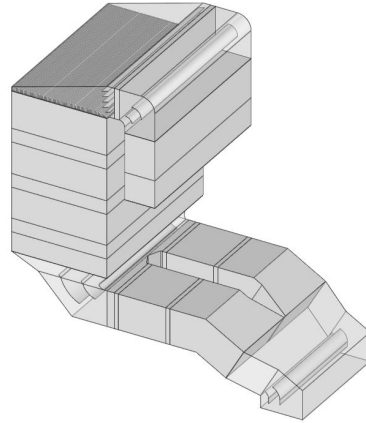


图1 SCR烟气脱硝系统结构示意图

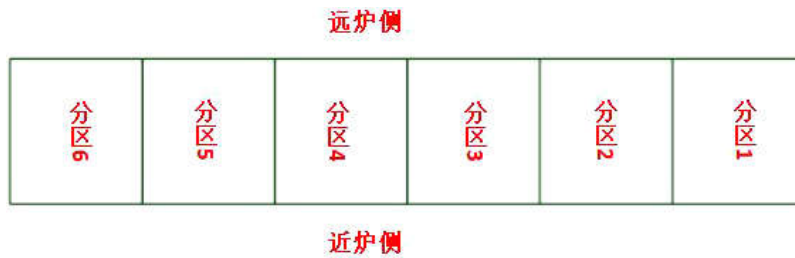


图2 进口分区示意图

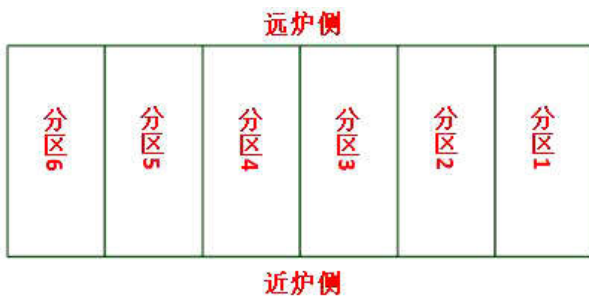


图3 出口分区示意图

1.3 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、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600万。

1.4 边界条件

本研究将烟道入口定义为流量进口边界,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	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2 边界条件参数

名称	数值
进口烟气流量 (kg/h)	540000
烟道入口当量直径 (m)	3.726
烟道出口当量直径(m)	4.5
入口氨气流量 (kg/h)	100

2 结果与讨论

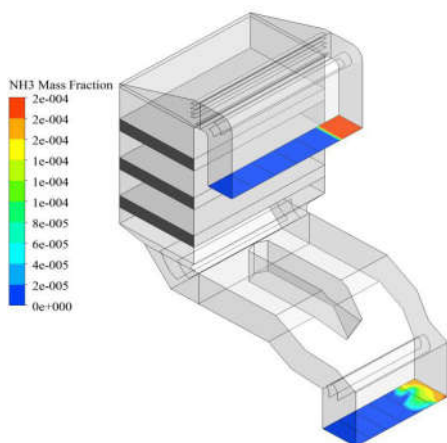


图4 工况1进出口截面氨气分布

表3 工况1模拟结果

序号	入口		出口
	氨气流量 kg/h	氨气流量 kg/h	分区氨气流量/入口氨气 总流量
分区1	100	74.98	74.98%
分区2	0	24.33	24.33%
分区3	0	0.67	0.67%
分区4	0	0.02	0.02%
分区5	0	0.00	0.00%
分区6	0	0.00	0.00%

工况1的模拟结果如表3所示，工况1的进口分区1氨气流量为100kg/h，其余进口分区的氨气流量均为0kg/h，出口截面对应的出口分区1氨气流量为74.98kg/h，出口分区2中的氨气流量为24.33kg/h，这是因为氨气与烟气混合过程中，氨气会向周围浓度低的区域扩散，导致一部分氨气扩散到出口分区2中。工况1进出口截面氨气浓度分布如图4所示，进口分区1中氨气在烟道内部与烟气混合，氨气向周围浓度低的区域扩散，部分烟气扩散到出口分区2中，由于进口分区1一侧存在壁面，壁面的阻挡作用消除了进口分区1的扩散效应，因此导致出口分区1氨气浓度高的区域均分布在分区1的近壁面侧。

表4 工况2模拟结果

序号	入口		出口
	氨气流量 kg/h	氨气流量 kg/h	分区氨气流量/入口氨气 总流量
分区1	0	30.41	30.41%
分区2	100	53.02	53.02%
分区3	0	15.23	15.23%
分区4	0	1.31	1.31%
分区5	0	0.03	0.03%
分区6	0	0.00	0.00%

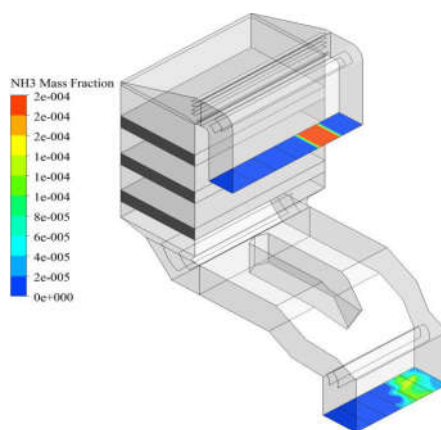


图5 工况2进出口截面氨气分布

工况2的模拟结果如表4所示，工况2的进口分区2氨气流量为100kg/h，其余进口分区的氨气流量均为0kg/h，出口截面对应的出口分区2氨气占比为53.02%，出口分区1中的氨气占比为30.41%，出口分区3中的氨气占比为15.23%，出口分区4中的氨气流量为1.31%。工况2进出口截面氨气浓度分布如图5所示，由于浓度差的存在，氨气从进口分区2进入烟道内部与烟气混合，氨气会向周围浓度低的区域扩散，扩散的速度受浓度差的影响，且由于催化剂下游存在烟道拐角和烟道合并段，导致分区对应性差，一部分氨气偏向出口分区1和出口分区3。

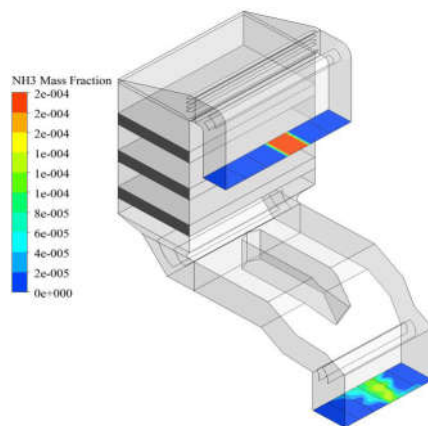


图6 工况3进出口截面氨气分布

表5 工况3模拟结果

序号	入口		出口
	氨气流量 kg/h	氨气流量 kg/h	分区氨气流量/入口氨气 总流量
分区1	0	2.88	2.88%
分区2	0	18.22	18.22%
分区3	100	57.78	57.78%
分区4	0	18.54	18.54%
分区5	0	2.34	2.34%
分区6	0	0.24	0.24%

工况3的模拟结果如表5所示，工况3的进口分区3氨气流量为100kg/h，其余进口分区的氨气流量均为0kg/h，出口截面对应的出口分区3氨气流量为57.78kg/h，出口分区1中的氨气流量为2.88kg/h，出口分区2中的氨气流量为18.22kg/h，出口分区4中的氨气流量为18.54kg/h，出口分区5中的氨气流量为2.34kg/h，进口分区3中的氨气向两侧分区扩散的效果比较均匀，扩散至分区2和分区5的氨气量相差较小。工况3进出口截面氨气浓度分布如图6所示，进口分区3和出口分区3的对应关系较差，这是因为氨气从进口分区3进入烟道，在烟道内部与烟气混合，氨气会向周围浓度低的区域扩散，且由于催化剂下游存在烟道拐角和烟道合并段，导致氨气在烟道内部的分区分对应关系较差，部分烟气流入出口其他分区。

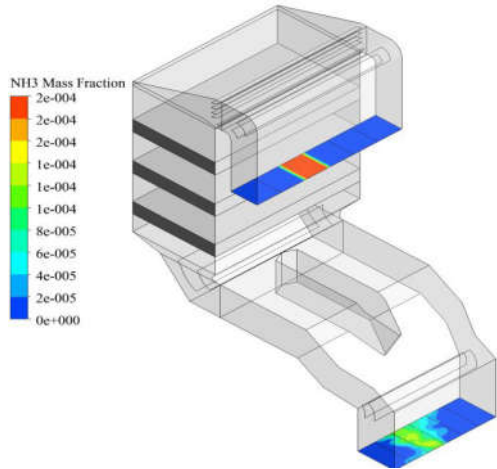


图7 工况4进出口截面氨气分布

表6 工况4模拟结果

序号	入口		出口
	氨气流量 kg/h	氨气流量 kg/h	分区氨气流量/入口氨气 总流量
分区1	0	0.35	0.35%
分区2	0	3.16	3.16%
分区3	0	18.32	18.32%
分区4	100	57.18	57.18%
分区5	0	18.12	18.12%
分区6	0	2.87	2.87%

工况4的模拟结果如表6所示，工况4的进口分区4氨气流量为100kg/h，其余进口分区的氨气流量均为0kg/h，出口截面对应的出口分区4氨气占比为57.18%，出口分区2中的氨气占比为3.16%，出口分区3中的氨气占比为18.32%，出口分区5中的氨气流量为18.12%，出口分区6中的氨气占比为2.87%，进口分区4与出口分区的对应关系和工况3的分区3相似。工况4进出口截面氨气浓度分布如图7所示，工况4进口分区4和出口分区4的对应关系较

差，进口分区4的氨气向周围浓度低的区域扩散，导致分区分对应性变差，只有一部分氨气流过对应的出口分区4，出口截面分区4的氨气分布情况和工况3的分区3相似。

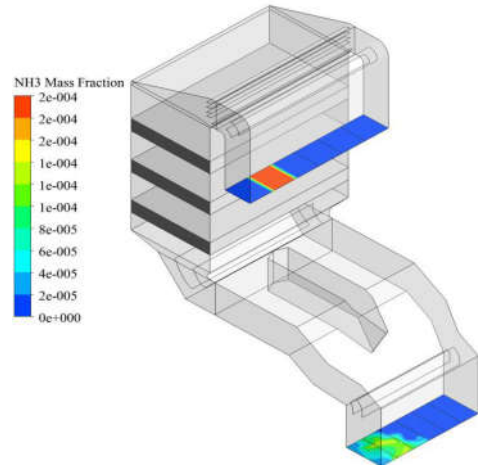


图8 工况5进出口截面氨气分布

表7 工况5模拟结果

序号	入口		出口
	氨气流量 kg/h	氨气流量 kg/h	分区氨气流量/入口氨气 总流量
分区1	0	0.00	0.00%
分区2	0	0.02	0.02%
分区3	0	1.33	1.33%
分区4	0	14.96	14.96%
分区5	100	52.80	52.80%
分区6	0	30.88	30.88%

工况5的模拟结果如表7所示，工况5的进口分区5氨气流量为100kg/h，其余进口分区的氨气流量均为0kg/h，出口截面对应的出口分区5氨气流量为52.8kg/h，出口分区3中的氨气流量为1.33kg/h，出口分区4中的氨气流量为14.96kg/h，出口分区6中的氨气流量为30.88kg/h，进口分区5与出口分区的对应关系和工况2的分区2相似。工况5进出口截面氨气浓度分布如图8所示，工况5进口分区5和出口分区5的对应关系较差，进口分区5的氨气在烟道内部与烟气混合，氨气会向周围浓度低的区域扩散，且由于催化剂下游存在收缩段、拐角和合并段，导致氨气向分区6偏移，分区分对应性变差，只有一部分氨气通过对应的出口分区5，出口截面分区5的氨气分布情况和工况2的分区2相似。

表8 工况6模拟结果

序号	入口		出口
	氨气流量 kg/h	氨气流量 kg/h	分区氨气流量/入口氨气 总流量
分区1	0	0.00	0.00%
分区2	0	0.00	0.00%

续表:

序号	入口		出口
	氨气流量 kg/h	氨气流量 kg/h	分区氨气流量/入口氨气 总流量
分区3	0	0.02	0.02%
分区4	0	0.72	0.72%
分区5	0	22.76	22.76%
分区6	100	76.51	76.51%

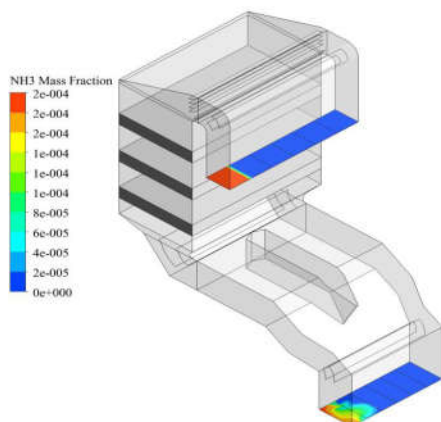


图9 工况6进出口截面氨气分布

工况6的模拟结果如表8所示, 工况6的进口分区6氨气流量为100kg/h, 其余进口分区的氨气流量均为0kg/h, 出口截面对应的出口分区6氨气占比为76.51%, 出口分区5中的氨气占比为22.76%, 进口分区6与出口分区的对应性较好, 对应关系与工况1的分区1相似。工况6进出口截面氨气浓度分布如图9所示, 工况6出口截面分区6与工况1出口截面分区1的氨气浓度分布规律相似, 进口分区6中氨气在烟道内部与烟气混合, 氨气向周围浓度低的区域扩散, 部分烟气扩散到出口分区5中, 由于进口分区6另一侧存在壁面, 壁面的阻挡作用消除了进口分区6氨气的一部分扩散效应, 因此进口分区6与出口截面分区的对应性最佳。

3 结论

通过FLUENT软件对某电厂燃煤发电机组SCR脱硝系统进行数值模拟, 研究脱硝系统进出口分区对应性, 模拟结果表明:

(1) 脱硝系统的进出口分区的对应关系受烟道内部的结构影响, 烟道内部的收缩段、拐角和合并段, 会使氨气在烟道内部出现偏移, 导致进出口分区对应性变差。

(2) 脱硝系统的进出口分区的对应关系沿烟道中心线对称相似, 分区1和分区6、分区2和分区5、分区3和分区4的出口截面氨气分布规律和分区对应关系相似。

(3) 烟道两侧的壁面的阻挡作用抵消了氨气在工况1的分区1和工况6的分区6壁面侧的扩散效应, 只有少部分氨气扩散至其他分区, 分区1和分区6的分区对应性最佳。

参考文献

- [1]朱存旭. 火电机组SCR脱硝系统喷氨优化改造[J]. 应用能源技术, 2019, (11): 1-4.
- [2]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.
- [3]赵庆伟, 张灿灿, 岳浩, 等. SCR脱硝喷氨格栅优化调节系统应用[J]. 山东电力技术, 2021, 48(01): 69-72.
- [4]李志军. 燃煤电厂SCR系统精准喷氨优化提升[J]. 电器工业, 2022, (03): 62-66.
- [5]于子龙, 由文江, 马鸣鹤. 火电厂脱硝系统分区控制精准喷氨优化改造[J]. 电力设备管理, 2021, (09): 163-164+175.
- [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]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]陆伟. 基于CFD示踪模拟的SCR系统喷氨优化调整研究[J]. 科技资讯, 2017, 15(21): 29-30.
- [9]胡劲逸. 基于氨逃逸浓度场的SCR喷氨协调优化控制[D]. 浙江大学, 2015.
- [10]宋绍伟, 赵虎军, 丁先, 等. 660MW机组SCR装置精细化喷氨改造研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(03): 75-82.
- [11]崔恒波, 张东昇, 腾飞, 等. 栅格型导流板对SCR反应器内流场影响特性分析[J]. 水泥工程, 2023, (05): 5-8+34.
- [12]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.