

SCR 脱硝流场对氨逃逸影响的诊断优化及应用

Diagnosis optimization and application of the flow field of SCR denitration reactor on ammonia escape

张楚城^{1,2}, 叶兴联^{2,3}, 苏寅彪², 杨丁²

(1. 浙江大学工程师学院 浙江 杭州 310015; 2. 福建龙净环保股份有限公司实验研究中心, 福建 龙岩 364000; 3. 东北大学冶金学院 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 逃逸氨与烟气中的 SO_3 反应生成 NH_4HSO_4 后容易对下游设备运行造成影响, 这与氨的利用率不均匀直接相关。以某 300 MW 火电机组 SCR 脱硝改造工程为研究对象, 采用 CFD 数值模拟方法对其流场进行了诊断, 提出了流场优化设计方案, 对比了优化前后的流场和氨逃逸变化情况。结果表明: 通过设计合理的导流措施和喷氨混合措施, SCR 脱硝装置内速度场、浓度场等流场分布得到了明显的改善, 脱硝效率得到了较大的提高, 氨逃逸也得到了明显的抑制, 从定性和定量上解释了流场设计对脱硝系统性能的影响作用。可为 SCR 脱硝系统氨逃逸的诊断和改造措施提供借鉴意义。

关键词: SCR 脱硝; 流场优化; 数值模拟; 氨逃逸

Abstract: Escape ammonia reacts with the SO_3 in flue gas to produce NH_4HSO_4 , that easy to affect downstream equipment operation, which is directly related to the uneven utilization rate of ammonia. Taking a 300 MW SCR denitration transformation project for thermal power unit as the research object, diagnosing its flow field by CFD numerical simulation method, proposing its flow field optimization design scheme, and comparing its flow field and ammonia escape changes before and after optimization. The results show that with the reasonable design of diversion and ammonia injection measures, the distribution of velocity field, concentration field and other flow fields in SCR reactor get obvious improvement, denitration efficiency improves greatly, ammonia escape have obvious inhibition. The influence of flow field design on the performance of SCR reactor is explained qualitatively and quantitatively. It can provide reference for the diagnosis and reconstruction of ammonia escape in SCR denitration system.

Key words: SCR reactor; flow field optimization; numerical simulation; ammonia escape

中图分类号: X701.7

文献标识码: B

文章编号: 1674-8069(2019)03-013-05

0 引言

选择性催化还原脱硝方法 (Selective Catalytic Reduction, SCR) 因其脱硝效率高、技术成熟在燃煤电站中得到广泛应用^[1]。在实际运行过程中受锅炉燃烧工况、喷氨格栅和氨-烟气混合器结构设计、烟道流场均匀性、催化剂种类和性能等因素影响, 普遍存在 SCR 反应器出口氨逃逸量过高的问题^[2]。在 SCR 脱硝工艺中, 氨逃逸量的控制至关重要。氨逃逸量过高会造成催化剂中毒、锅炉尾部烟道及空气预热器换热面腐蚀积灰堵塞等问题, 乃至会影响锅炉的安全、经济运行^[3-4]。

目前, 国内学者通过大量现场喷氨调整优化试验, 实现了脱硝系统出口 NO_x 的均匀分布以及降低氨逃逸量^[5-9], 但考虑流场优化对现场设备性能优化效果影响的研究还较少。而烟气流场不均, 造成局部喷氨量过大恰恰是引起逃逸量偏高的关键原因之一。同时, 国内学者在流场优化的研究中, 大多没有考虑 SCR 催化反应过程^[10-15], 而在化学动力学研究中多从催化剂单元孔出发, 大多没有结合实际流场分布情况^[16-20]。为此, 本文借助 CFD 软件, 以某 300 MW 机组 SCR 脱硝改造工程为研究对象, 对其流场进行了诊断及优化, 研究了优化前后流场分布、脱硝效率和氨逃逸量的变化情况, 从定性和定量

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0203703); 龙岩市基础研究与青年人才项目(2017LY82)

上证实了流场分布均匀性是脱硝系统性能的关键因素,并以此为SCR脱硝系统氨逃逸的诊断和改造措施提供借鉴意义。

1 工程概况

某300 MW亚临界机组SCR脱硝装置采用高温高尘布置方式,锅炉配备2个SCR反应器,催化剂采用“2+1”模式布置,催化剂截面尺寸7080 mm × 13700 mm。在超低排放的形势下,该机组要求进行提效改造,并开展流场优化数值模拟,SCR反应器主要设计参数见表1。

表1 SCR反应器主要设计参数(单侧反应器)

项目	数值
烟气流量(标干态, $\beta\% \text{O}_2$) / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	550000
设计温度	360
省煤器出口处静态压力/kPa	-0.43
耗量(液氨) / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	≤ 97.76
稀释风量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	6900
催化剂设计阻力/Pa	200
入口 NO_x (标干态, $\beta\% \text{O}_2$) / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	500
出口 NO_x (标干态, $\beta\% \text{O}_2$) / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	≤ 50
总脱硝效率/%	$\geq 90\%$
氨逃逸量 / $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	≤ 3

由于2个SCR反应器以锅炉中心线呈镜像对称布置,故以单侧反应器作为研究对象。研究范围从省煤器出口至空预器入口,省煤器出口截面尺寸7253 mm × 9568 mm,空预器入口截面尺寸3430 mm × 10096 mm。

图1给出了优化前后的SCR反应器几何模型。优化前喷氨混合技术是将烟道截面沿宽度方向划分成7个喷氨单元,每个喷氨单元由1根喷氨管组成,并对应布置1块 $\phi 1300$ mm的圆盘,如图1(a)所示。所采取的优化方案如下:①在喷氨格栅上游烟道增设或调整导流板来改善喷氨区域的流场分布;②在顶部斜坡烟道增设导流板和阻流板以改善催化剂入口的流场分布;③喷氨混合改造,将烟道截面沿宽度方向划分成“2 × 7”块喷氨单元,每个喷氨单元由1根工字型喷氨格栅组成,每根喷氨格栅上设有8个喷氨口,同时在喷氨格栅下游布置“2 × 12”块 $\phi 800$ mm的圆盘。

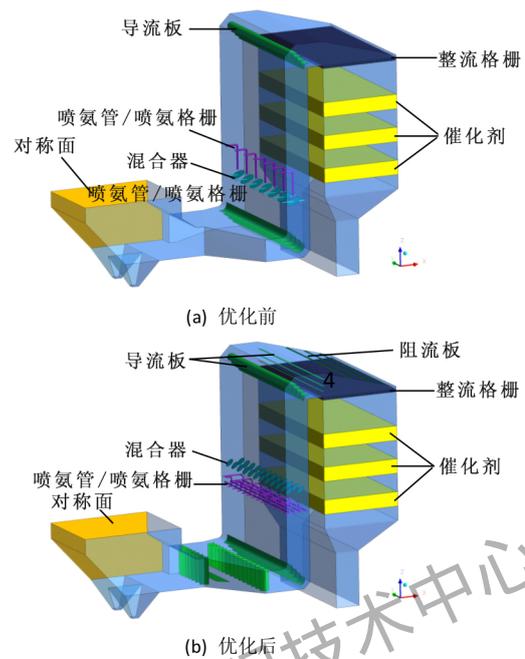


图1 SCR反应器几何模型

2 数学模型

2.1 气相湍流模型

烟气在烟道内的流动状态为湍流,采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型和 SIMPLE 压力-速度耦合算法。气流流动控制方程包括质量守恒方程、能量守恒方程、动量守恒方程和组分守恒方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \text{div}(\rho\varphi\vec{u}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中: ρ 为烟气密度, kg/m^3 ; \vec{u} 为烟气速度矢量, m/s ; φ 为通用变量,如质量、温度等; Γ 为广义扩散系数; S_{φ} 为广义源项。

2.2 化学反应模型

SCR脱硝催化反应的模拟过程中,做出以下简化与假设:

(1) 假设 NO_x 全部为 NO ,仅考虑 NO 与 NH_3 的反应,忽略 NH_3 氧化等副反应,同时不考虑催化还原反应的具体反应机理。

(2) 忽略烟气中粉尘对 NH_3 的粘附,不考虑飞灰对反应造成的影响。

(3) 将催化剂简化为多孔介质模型,按催化剂设计压降 200 Pa 设置阻力系数。

选用涡耗散反应模型 Eddy-dissipation reaction 的体积反应 Volumetric Reactions 模拟催化还原反应

过程。反应速率用阿伦尼乌斯定律描述,具体反应动力学参数见表 2。

表 2 SCR 脱硝反应动力学参数^[21]

化学反应	指前因子	温度指数 b	活化能 /kJ · mol ⁻¹
4NH ₃ + 4NO + O ₂ → 4N ₂ + 6H ₂ O	2.25E + 06	0.014	55.57

2.3 边界条件

假设烟气为不可压缩气体,流动处于稳态、入口速度均匀;烟气入口边界和喷氨入口边界采用速度入口边界,速度值分别由烟气流量和喷氨量计算得到;出口边界采用压力出口边界;导流板、整流格栅等均采用壁面边界。

3 分析与讨论

3.1 优化前后流场分布

工程中多以相对标准偏差值(C_v 值)来定量评价测试断面变量分布的均匀性,其值越小,表明变量越均匀,表达式如下:

$$C_v = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: x_i 为测点变量值,如速度、浓度; \bar{x} 为测点平均值; n 为截面测点数。

对 SCR 脱硝装置优化前后的流场分布规律,模拟结果如表 3 所示。从表中的对比结果来看,经过优化后,催化剂入口的速度分布均匀性、最大入射角度和氨氮摩尔比均匀性都有明显的改善。可见,选择合理的优化方案对脱硝设备流场指标的改善有明显的效果。

表 3 SCR 脱硝装置优化前后的流场分布指标

项目	首层催化剂上游 0.5 m 处		
	速度分布 C_v 值/%	最大入射角度/°	氨氮摩尔比 C_v 值/%
技术要求	≤15	≤10	≤5
优化前	25.6	30.9	36.5
优化后	5.7	7.4	4.9

图 2 和图 3 分别给出了优化前后首层催化剂上游 0.5 m 处的速度分布和烟气入射催化剂角度分布情况。从图 2(a) 和 3(a) 可知,优化前 SCR 脱硝装置由于顶部斜坡烟道的未合理布置导流措施,导致

首层催化剂上游远离锅炉侧出现局部高速区,进而造成速度分布不均和烟气入射催化剂角度大,存在着催化剂磨损的潜在风险。从图 2(b) 和 3(b) 可知,经过在顶部增设导流板和阻流板的优化措施后,首层催化剂入口的局部高速区得到消除,断面最大速度由原来的 10.13 m/s 降低为 4.80 m/s,同时烟气入射催化剂角度由原来的 30.9° 减小为 7.4°,流场分布满足速度 C_v 值小于 15% 及入射角度小于 10° 的技术要求^[22]。

图 4 给出了优化前后首层催化剂上游 0.5 m 处的氨氮摩尔比分布情况。

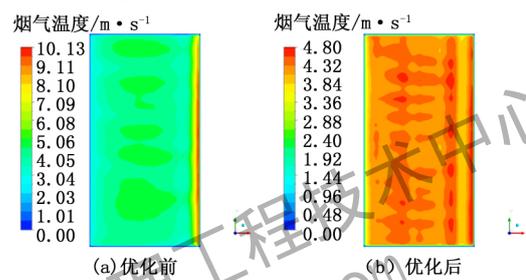


图 2 首层催化剂上游 0.5 m 处的速度分布

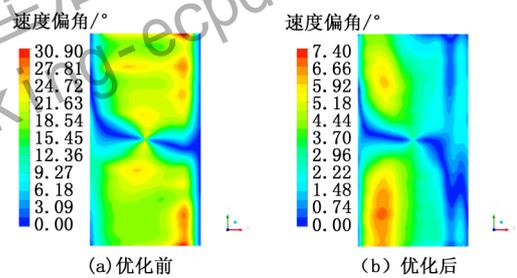


图 3 首层催化剂上游 0.5 m 处的烟气入射催化剂角度分布

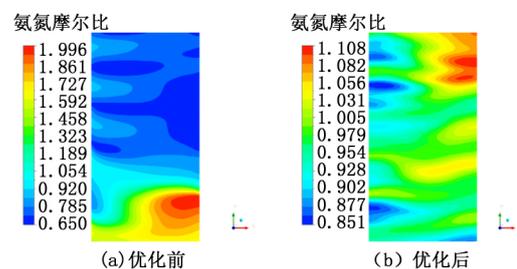


图 4 首层催化剂上游 0.5 m 处的氨氮摩尔比分布

优化前 SCR 脱硝装置首层催化剂入口氨氮摩尔比分布不均。经过喷氨格栅上游导流板的优化,喷氨区域烟气速度分布变均匀,喷氨上游断面 C_v 值为 15.7%,同时喷氨混合技术的优化设计,使得喷氨不会过于集中而是均匀分散在整个截面上,相应地混合器数量增加至 24 个,强化了烟气与氨气的混

合,从而使得首层催化剂入口氨氮摩尔比分布均匀,氨氮摩尔比 C_v 值为 4.9%,满足氨氮摩尔比 C_v 值小于 5% 的技术要求^[22]。

3.2 优化前后脱硝效果

选取氨氮摩尔比为 0.975:1,SCR 脱硝装置优化前后脱硝效果见表 4。从表可知,由于优化前首层催化剂入口的氨氮摩尔比分布不均,反应器的总脱硝效率为 79.6%,不能满足总脱硝效率不小于 90% 的工程设计要求,氨逃逸量高达 46.4 $\mu\text{L/L}$,这将会造成空气预热器的换热面严重堵塞。而经过优化后,首层催化剂入口的氨氮摩尔比分布均匀,反应器的总脱硝效率 91.6%,脱硝效率提高了 12.0%,满足工程设计要求,氨逃逸量为 14.9 $\mu\text{L/L}$,降低了 67.9%。由于本文模拟过程中,忽略了 NH_3 的副反应和粉尘粘附作用等的损耗,故模拟结果中的氨逃逸量值会偏大,若假设 NH_3 的总损耗为 5%,则优化后的氨逃逸量为 2.8 $\mu\text{L/L}$,满足氨逃逸量小于 3 $\mu\text{L/L}$ 的工程设计要求。

表 4 SCR 脱硝装置优化前后的脱硝性能

项 目	脱硝效率/%		氨逃逸量/ $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	
	优化前	优化后	优化前	优化后
第一层催化剂入口	-	-	242.0	242.0
第二层催化剂入口	65.2	72.3	80.8	62.6
第三层催化剂入口	31.9	53.0	53.9	26.3
第三层催化剂出口	14.1	35.3	46.4	14.9
合计	79.6	91.6	-	-

图 5~7 分别给出了优化前后第二层催化剂入口、第三层催化剂入口及出口断面的氨氮摩尔比分布图。结合图 4 可知,优化前各层催化剂入口及第三层催化剂出口的氨氮摩尔比 C_v 值分别为 39.0%、117.2%、167.6%、197.4%,优化后这 4 个断面的氨氮摩尔比 C_v 值分别降至 4.9%、18.6%、43.1% 和 84.9%,优化前后每经过一层催化剂,其氨氮摩尔比分布均匀性都会变差。

此外,图 5~7 还可看出,对于氨氮摩尔比小于 1 的区域,三层催化剂后氨逃逸量已基本降低在很低的水平,而对于氨氮摩尔比大于 1 的区域,由于 NH_3 缺少 NO_x 与之反应,经过三层催化剂后逃逸。说明氨逃逸大多来自局部氨氮摩尔比大于 1 的区域,也证实了氨氮摩尔比分布的均匀性是影响氨逃

逸量的关键因素。

图 8 给出了优化前后出口断面的 NO 浓度分布图。统计得到,优化前后出口断面的 NO 浓度 C_v 值分别为 53.0% 和 30.4%,可见尽管经过流场优化,首层催化剂氨氮摩尔比分布均匀,满足技术要求,但出口 NO 浓度分布的均匀性虽然相对优化前有所改善,但仍较差。因此,在工程现场通过测量出口 NO 的浓度分布情况进行喷氨调整优化试验时,没有必要过分地追求出口 NO_x 浓度分布的均匀性,应结合实际脱硝性能进行优化调整。

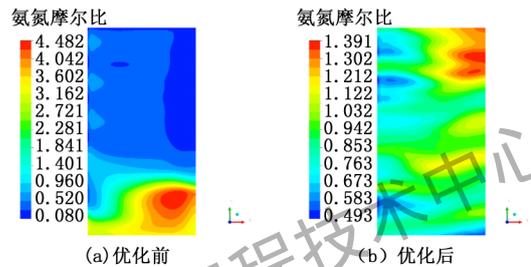


图 5 第二层催化剂上游 0.5 m 处氨氮摩尔比分布

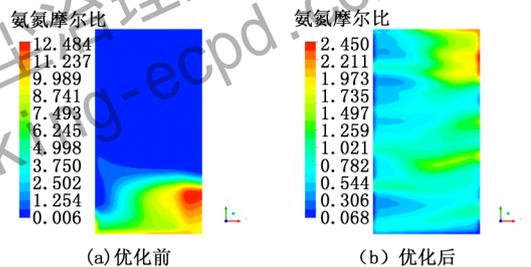


图 6 第三层催化剂上游 0.5 m 处氨氮摩尔比分布

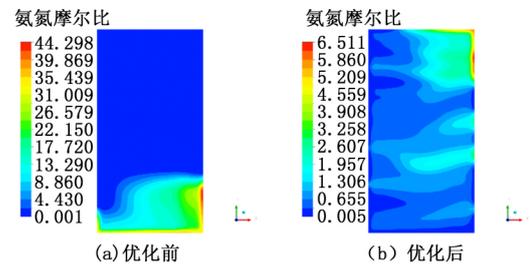


图 7 第三层催化剂下游 0.5 m 处氨氮摩尔比分布

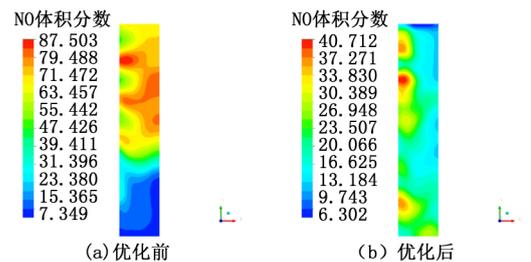


图 8 出口断面的 NO 浓度分布

3.3 运行效果

该机组 SCR 脱硝装置自改造投运以来,运行稳定,脱硝效率和氨逃逸均满足设计要求,达到了工程提效改造的目的。

完成改造后,在 160 MW 负荷时进行了现场性能测试,以 A 侧反应器为例,运行条件如下: SCR 脱硝的处理烟气流量为 $250001 \text{ m}^3/\text{h}$ (标干态, 6% O_2 , 下同), 脱硝入口 NO_x 浓度为 $486.6 \text{ mg}/\text{m}^3$, 氨耗量为 $44.375 \text{ kg}/\text{h}$ 。运行效果如下: 脱硝出口 NO_x 浓度为 $18.8 \text{ mg}/\text{m}^3$, 脱硝效率为 96.1%, 逃逸氨浓度为 0.87 ppm。其中, 脱硝出口 NO_x 浓度分布 C_v 值分别为 32.7%, 与模拟结果相近。可见, 虽然脱硝出口 NO_x 浓度分布均匀性较差, 但是仍可达到脱硝效率高、氨逃逸量低的性能要求。

4 结语

(1) 经流场优化调整, 首层催化剂入口的速度 C_v 值、最大入射角度和氨氮摩尔比 C_v 值, 分别由原来的 25.6%、 30.9° 、36.5% 降低至 5.7%、 7.4° 、和 4.9%。合理的设计导流措施和喷氨混合结构能够大幅度改善 SCR 脱硝装置内部的流场分布, 为脱硝工程高效稳定运行提供了有利的条件。

(2) 经流场优化调整, SCR 脱硝装置的脱硝效率由原来的 79.6% 提高至 91.6%, 氨逃逸量降低了 67.9%, SCR 出口的 NO_x 浓度分布均匀性也得到了改善。从定性和定量上解释了流场优化设计对脱硝系统性能的影响作用, 可为 SCR 脱硝系统的提效改造提供参考。

(3) 数值模拟表明, 每经过一层催化剂, 氨氮摩尔比分布均匀性会下降, 进而影响 SCR 脱硝装置的脱硝效率和氨逃逸量; SCR 脱硝装置的氨逃逸主要来源于局部氨氮摩尔比大于 1 的区域, 氨氮摩尔比分布的均匀性是影响氨逃逸量的关键因素。

(4) 数值模拟和现场测试表明, 在工程现场开展喷氨调整优化试验时, 脱硝出口 NO_x 的浓度分布是调节各喷氨管喷氨比例的重要依据, 但是不应过分地追求出口 NO_x 浓度分布的均匀性, 应结合脱硝性能开展优化试验。

参考文献:

[1] 孙克勤, 钟秦. 火电厂烟气脱硝技术及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

- [2] 胡永锋, 梁新磊. 燃煤电厂 SCR 法烟气脱硝装置常见问题及原因分析[J]. 华电技术, 2015(11): 62-64.
- [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.
- [4] 惠润堂, 韦飞, 王宝德, 等. SCR 法烟气脱硝后空气预热器堵塞及应对措施[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 110-112.
- [5] 方朝君, 金理鹏, 余美玲. SCR 脱硝喷氨优化与运行控制研究[J]. 电力科技与环保, 2015, 31(06): 39-42.
- [6] 陈伟武, 胡木林, 陈敏. 1036 MW 机组选择性催化还原系统优化运行及脱硝效率诊断[J]. 华电技术, 2014, 36(5): 61-65.
- [7] 张翠珍, 赵学葵. 大型燃煤机组 SCR 脱硝系统优化[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 5997-6004.
- [8] 于洪海, 谭袖, 李超, 等. 燃煤机组超低排放改造后 SCR 喷氨优化调整试验研究[J]. 资源节约与环保, 2017(10): 10-11.
- [9] 马大卫, 张其良, 黄齐顺, 等. 超低排放改造后 SCR 出口 NO_x 分布及逃逸氨浓度评估研究[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 168-171.
- [10] 杨松, 丁皓妹, 黄越. SCR 脱硝系统流场数值模拟及优化[J]. 热力发电, 2014(9): 71-75.
- [11] 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.
- [12] 杨丁, 郭俊, 叶兴联, 等. 深度脱硝流场优化工程案例 [A]. 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷) [C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2017.
- [13] 王东, 罗祥, 马国伟. 660 MW 机组 SCR 脱硝系统流场优化试验研究[J]. 电站系统工程, 2017(4): 17-20.
- [14] 叶兴联, 杨丁, 郭俊, 等. SCR 脱硝超低排放工程改造流场优化[J]. 环境工程学报, 2018, 12(06): 1725-1732.
- [15] 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.
- [16] 刘智湘. 在役 SCR 催化剂活性及动力学参数研究[D]. 华南理工大学, 2013.
- [17] 沈伯雄, 赵宁, 刘亭. 烟气脱硝选择性催化还原催化剂反应模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(8): 31-37.
- [18] 徐旭. $\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiC}$ 催化剂烟气脱硝机理及其反应动力学研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
- [19] 周英贵. 大型电站锅炉 SNCR/SCR 脱硝工艺试验研究、数值模拟及工程验证[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [20] 熊尚超. NH_3 -SCR 稳态反应动力学的构建及其在几种典型催化剂上的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [21] Kee R J, Rupley F M, Miller J A, et al. CHEMKIN Release 4.0 [M]. Reaction Design, 2004.
- [22] JB-T 13175-2017, 燃煤烟气脱硝数值和物理模拟试验方法[S].

收稿日期: 2018-10-12; 修回日期: 2018-11-04

作者简介: 张楚城(1991-), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 主要从事环保治理设备的数值模拟研究。E-mail: fj_zcc@163.com