

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212216

燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统流场均布 一体化建模与性能优化

张媛媛^{1,2}, 曲江源², 张 锴²

(1. 华北电力大学新能源学院, 北京 102206;

2. 华北电力大学热电生产过程污染物监测与控制北京市重点实验室, 北京 102206)

[摘要] 选择性催化还原 (SCR) 烟气脱硝效率与其内部烟气和还原剂流动的均匀性密切相关。在建立 SCR 烟气脱硝反应数学模型基础上, 采用用户自定义子程序耦合了多组分烟气流动与反应过程; 通过比较不同负荷下 330 MW 等级燃煤机组脱硝性能的实测与模拟数据验证了模型的可靠性和有效性, 基于对反应器内烟气和还原剂流动及其反应特性的数值模拟分析, 提出了喷氨格栅上游导流板结构优化方案, 进而考察了操作条件对 NO 和 NH₃ 排放质量浓度的影响。结果表明: 喷氨格栅来流烟气速度分布的非均匀性是导致烟气与还原剂混合效果较差的主要原因, 进而通过调整喷氨格栅上游导流板结构并在烟道壁面增设挡板可将脱硝效率提高约 3.37%; 为满足 NO_x 质量浓度为 50 mg/m³ 及 NH₃ 质量浓度为 2.5 mg/m³ 的排放限值需选取适宜喷氨量, 以所选取 SCR 烟气脱硝装置为例, 当烟气初始 NO 质量浓度为 650 mg/m³, SCR 烟气脱硝系统适宜氨氮摩尔比应约为 0.94。

[关键词] 燃煤机组; 烟气脱硝; SCR; 流场优化; 数值模拟

[引用本文格式] 张媛媛, 曲江源, 张锴. 燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统流场均布一体化建模与性能优化[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 146-155. ZHANG Yuanyuan, QU Jiangyuan, ZHANG Kai. Integrated modeling and performance optimization of flow field homogenization in SCR denitrification system of coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 146-155.

Integrated modeling and performance optimization of flow field homogenization in SCR denitrification system of coal-fired unit

ZHANG Yuanyuan^{1,2}, QU Jiangyuan², ZHANG Kai²

(1. School of New Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Key Laboratory of Emission Surveillance and Control for Thermal Power Generation, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The denitration efficiency is closely related to the uniformity of flue gas and reductant agent within the selective catalytic reduction (SCR) reactor for the coal-fired unit. Based on the established mathematical model for SCR denitration reaction, a user-defined subprogram is used to couple the multi-component flue gas flow with reaction process. The reliability and effectiveness of the CFD model are verified by comparing the measured and simulated data of the SCR performance of 330 MW level coal-fired units at different loads. According to the hydrodynamics of flue gas and reductant agent together with the chemical reaction process in SCR reactor, a new intensification scheme is proposed by optimizing the structure of deflectors in front of the ammonia injection grids. Furthermore, the effects of operational conditions on emission mass concentration of NO and NH₃ are investigated. The results indicates that, the maldistribution of the incoming flue gas to the ammonia injection grids leads to the poor mixing behavior of flue gas and reducing reagent. However, the denitration efficiency of the SCR reactor can be improved by about 3.37% through adjusting the upstream guiding plate structure and installing the baffle around the flue duct wall. Taking the SCR denitration device in this work as an example, the appropriate molar ratio of NH₃ to NO is 0.94 when the initial NO mass concentration is 650 mg/m³, which could meet with the emission limit

修回日期: 2022-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB0606203)

Supported by: National Key Research and Development Program (2020YFB0606203)

第一作者简介: 张媛媛 (1985), 女, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向污染物控制技术, zyy19851130@126.com。

for air pollutions of 50 mg/m³ for NO_x and 2.5 mg/m³ for NH₃, respectively.

Key words: coal-fired unit; flue gas denitration; SCR; flow field optimization; numerical simulation

NO_x 是主要大气污染物之一, 其中燃煤锅炉是我国 NO_x 主要排放源^[1]。为此《煤电节能减排升级与改造行动(2014—2020 年)》(发改能源[2014]2093 号文)对燃煤机组锅炉烟气提出超低排放要求, 其中 NO_x 排放质量浓度限制为 50 mg/m³ (基准氧体积分数 6%, 标况, 下同)^[2]。

NO 是燃煤电厂烟气中 NO_x 主要组分, 目前通常采用选择性非催化还原 (selective non-catalyst reduction, SNCR) 与选择性催化还原 (selective catalyst reduction, SCR) 方法将 NO 还原为 N₂ 实现 NO_x 脱除。SCR 方法具有脱硝率高、结构简单以及二次污染低等优点, 因此该技术在燃煤电厂 NO_x 控制过程中得到了广泛应用^[3-4]。为实现“双碳”战略目标, 风、光等间歇性可再生能源对火电机组的深度调峰等灵活性改造提出了更高要求^[5]。火电机组低负荷运行时, 由于烟温降低导致 SCR 烟气脱硝效率降低甚至存在停运风险, 因此控制火电机组在变负荷工况下 NO_x 排放量已成为关注的焦点^[6]。对于实际火电机组, 脱硝效率与氨逃逸量是 SCR 系统的关键性能指标, 主要受催化剂决定的反应动力学特性、烟气-还原剂流体动力学特性及操作条件等因素影响^[7]。

目前, SCR 技术工业应用通常采用基于 V₂O₅/TiO₂ 或 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 的钒基催化剂, 该系催化剂具有脱硝效率高、选择性较强的优点^[8-9]。对于采用钒基催化剂的 SCR 烟气脱硝过程, 一般基于 2 种反应机理描述其反应动力学特性^[10-11]: 其一为 Langmuir-Hinshelwood 反应机理, 该机理认为反应发生条件为 NH₃ 与 NO 同时吸附于催化剂表面相邻活性中心; 其二为 Eley-Rideal 反应机理, 该机理认为还原剂 NH₃ 吸附于催化剂表面后与 NO 分子发生反应, 共包括 NH₃ 吸附、SCR 反应和活性位再生共 3 个过程。Willi^[12]与 Odenbrand^[13]等对比了不同反应机理对钒基催化脱硝过程描述的适用性, 结果表明 Langmuir-Hinshelwood 机理可以较好地描述烟温低于 473 K 条件下反应过程, 而高于 473 K 时 Eley-Rideal 反应机理更符合实验结果。随后众多研究者^[10,14-17]基于 Eley-Rideal 机理建立 SCR 烟气脱硝催化反应动力学模型, 考察了诸如催化剂孔道内空速、反应物浓度、氨氮摩尔比 (normalized stoichiometric ratio, NSR) 和反应温度等条件对脱

硝反应特性的影响。

气体流动特性与反应物质量浓度分布是影响脱硝性能的另一重要影响因素, 为此 Sadeghi^[3]与李晗天^[7]等基于计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法建立了单孔道催化剂内气体流动与脱硝反应模型。其中, Sadeghi 等人^[3]对比了催化剂孔道形状对脱硝效率与烟气压降的影响, 李晗天等^[7]考察了催化剂入口速度分布特性对 SCR 脱硝反应过程的影响。上述研究表明不均匀的气速分布增大了 NO 与 NH₃ 排放质量浓度。对于工业规模 SCR 烟气脱硝系统, 烟气处于非理想流动且还原剂难以与烟气主流均匀混合, 局部高速气流导致 NSR 分布不均、脱硝效率降低且氨逃逸量增大, 同时可能加重催化剂磨损。基于 CFD 数值模拟方法, 樊庆铎等^[18]考察了直弧形导流板以及导流板数量对 SCR 烟气脱硝反应器内烟气流动特性的影响, 经优化后催化剂上层截面烟气流速偏差降低至 6.68%。Shang 等人^[19]详细分析了 SCR 烟气脱硝反应器内烟气流动结构, 结果表明 SCR 烟气脱硝系统结构复杂导致流场内存在多处烟气回流, 无导流板时催化剂层内存在流动死区。王海川^[20]和 Xu^[21]等通过优化 SCR 烟气脱硝系统烟道转折处弧形导流板结构改善了烟气流速与 NSR 分布均匀性, 并发现合理设计导流板结构可缓解导流装置引起的流动分离从而降低能耗。通过耦合烟气流动与 SCR 烟气脱硝反应动力学模型, 凌忠钱等^[22]通过优化 SCR 烟气脱硝系统烟道转折处导流板, 将 NSR 分布偏差降低至 5% 以下, 同时脱硝效率由 72.5% 提高至 83%。周智健等^[23]通过优化静态混合器与导流板结构将 NO 质量浓度偏差系数降低至 8% 以下, 同时脱硝效率提高约 7%。周英贵^[24]与李壮扬^[25]等研究发现通过优化分区喷氨方式可有效提高还原剂利用率, 且调整喷氨方式对烟气主流速度分布影响可忽略。

前述文献主要集中于 SCR 催化剂反应动力学特性^[11-17]、SCR 系统内烟气流动与反应特性研究^[3,5,18-25], 而对于变负荷工况下 SCR 反应器脱硝性能以及 NSR 对脱硝效率、氨逃逸量影响规律涉及较少。本文以 330 MW 等级燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统为研究对象, 建立了包括多组分烟气流动与催化反应过程的 CFD 模型, 提出了喷氨格栅来流烟气均布的优化方案, 考察了运行负荷、NO 质

量浓度与喷氨量等运行条件对 NO 与 NH₃ 排放特性的影响。

1 SCR 系统烟道内流动特性模拟方法

1.1 模拟对象

以某 330 MW 燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统为研究对象,该系统主要由对称布置的 SCR 烟气脱硝反应器、喷氨格栅 (ammonia injection grid, AIG)、静态混合器、烟道及导流板等组件构成。选取其中一侧 SCR 烟气脱硝系统为考察对象建立物理模型 (图 1)。SCR 烟气脱硝系统入口烟道截面尺寸为 11.7×2.8 m², SCR 脱硝反应器内包含 3 层蜂窝式催化剂,催化剂截面尺寸为 11.7×7.9 m²,单层高度为 1.4 m,相邻催化剂层间隔为 1.8 m,设计工况下 SCR 烟气脱硝系统操作条件见表 1。本文重点分析 SCR 烟气脱硝系统中烟气流动、还原剂 NH₃ 与烟气混合特性以及反应器内进行的脱硝反应一体化模型。

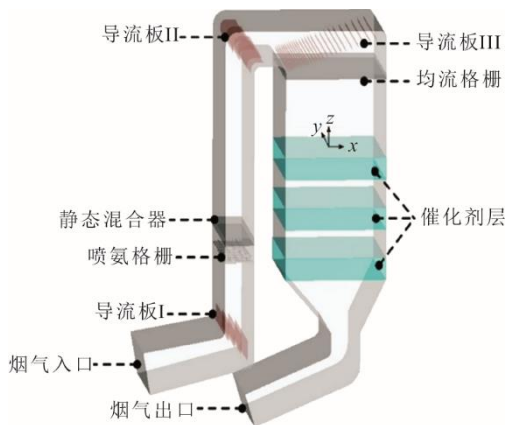


图 1 SCR 系统几何结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of geometric structure of the SCR system

表 1 烟气组构成与 SCR 系统运行参数

Tab.1 The flue gas composition and SCR system operation parameters

参数	数值
总烟气流量 $G_T/(m^3 \cdot h^{-1})$	1.25×10^6
单侧烟气流量 $G/(m^3 \cdot h^{-1})$	6.25×10^5
烟气温度 T/K	623.00
O ₂ 体积分数/%	3.99
H ₂ O 体积分数/%	6.98
CO ₂ 体积分数/%	13.57
N ₂ 体积分数/%	75.45
NO 质量浓度 $C_{NO,in}/(mg \cdot m^{-3})$	800
NSR	0.96

1.2 数学模型

将 SCR 烟气脱硝系统内烟气视为多组分混合

的理想气体,采用欧拉方法描述其流体动力学特性。由于 SCR 反应器烟气来流中 NO 为 NO_x 主要组分,其质量分数一般高于 90%^[7,10,23],因此本文以相同 NO_x 摩尔浓度为基准折算为 NO 质量浓度。原烟气组分主要包括 N₂、CO₂、H₂O、O₂ 与 NO,而还原剂组分主要包括 N₂、O₂ 与 NH₃。SCR 烟气脱硝过程中烟气湍流模拟采用基于雷诺数均的纳维-斯托克斯方程,并采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭方程组。烟气所遵循的总体质量、动量、能量守恒以及各气体组分质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

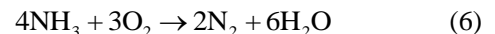
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T + \bar{\boldsymbol{\tau}} \mathbf{u} - \sum h_k \mathbf{J}_k) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_k) = \nabla \cdot \mathbf{J}_k + S_k \quad (4)$$

式中: ρ 为烟气密度, kg/m³; \mathbf{u} 为烟气流速, m/s; p 为压力, Pa; $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 为剪切应力张量, kg/(m·s²); \mathbf{g} 为重力加速度,取 9.8 m/s²; T 为烟气温度, K; λ 为导热系数, W/(m·K); e 为比内能, kJ/kg; h_k 为烟气中组分 k 焓值, kJ/kg; \mathbf{J}_k 为烟气中组分 k 扩散通量, kg/(m²·s); Y_k 为气相组分 k 质量分数; S_k 为控制体内因脱硝反应产生的源项,由反应动力学特性决定。

在 SCR 催化剂层内完成脱硝反应,其中主反应为 NO 由 NH₃ 还原转化为 N₂ (式(5)),同时伴随还原剂 NH₃ 的自身氧化 (式(6))。



SCR 反应器内为气固非均相催化反应,由于本文研究对象运行温度布置于省煤器后,烟温通常高于 473 K,SCR 催化反应遵循 Eley-Rideal 机理,并广泛应用于工业规模反应器内化学反应模型^[7,9-10]。基于此机理的 NO 与 NH₃ 反应速率为:

$$R_{\text{NO}} = k_{\text{NO}} C_{\text{NO}} \theta_{\text{NH}_3}^* (1 - e^{-\theta_{\text{NH}_3} / \theta_{\text{NH}_3}^*}) \quad (7)$$

$$\theta_{\text{NH}_3} = \frac{k_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_3}}{1 + k_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_3}} \quad (8)$$

$$R_{\text{NH}_3} = k_{\text{NO}} C_{\text{NO}} \theta_{\text{NH}_3}^* (1 - e^{-\theta_{\text{NH}_3} / \theta_{\text{NH}_3}^*}) + k_{\text{OX}} C_{\text{NH}_3} \quad (9)$$

式中: R_{NO} 与 R_{NH_3} 分别为 NO 与 NH₃ 消耗速率, kmol/(m³·s); C_{NO} 与 C_{NH_3} 分别为烟气中 NO 与 NH₃ 摩尔浓度, kmol/m³; $\theta_{\text{NH}_3}^*$ 为 NH₃ 在催化剂表面覆

盖率, $\theta_{\text{NH}_3}^*$ 为 NH_3 覆盖率临界值; k_{NO} 与 k_{OX} 分别为 NO 还原反应与 NH_3 自身氧化反应速率常数, s^{-1} ; k_{NH_3} 为 NH_3 吸附常数, s^{-1} 。

化学反应模拟采用有限速率模型, 其中反应模型涉及的动力学参数详见表 2^[9,24,26]。反应速率遵循阿累尼乌斯定律, 其表达式为:

$$k_i = A_i e^{-E_i/RT} \quad (10)$$

表 2 基于 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$ 催化剂 SCR 反应动力学参数
Tab.2 The SCR reaction kinetics parameters based on $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$ catalyst

项目	数值
$A_{\text{NO}}/\text{s}^{-1}$	7.19×10^5
$A_{\text{NH}_3}/(\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	8.20×10^{-4}
$A_{\text{OX}}/\text{s}^{-1}$	3.25
$E_{\text{NO}}/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	5.94×10^4
$E_{\text{NH}_3}/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	-7.63×10^4
$E_{\text{OX}}/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	2.87×10^4
$\theta_{\text{NH}_3}^*$	0.12

1.3 边界条件与数值求解

对于计算域边界条件, 烟气入口及喷氨格栅喷口设置为质量入口, 烟道及 SCR 反应器壁面设置为无滑移边界, 烟气出口视为压力出口, 设计工况下各边界数值条件详见表 1。数值计算过程中基于有限体积法实现控制方程式(1)~(4)的离散。离散方程组求解采用 SIMPLE 算法, 其中对流项离散采用二阶迎风格式。通过加载用户自定义程序 (user defined functions, UDF) 计算各组分消耗速率, 实现 SCR 烟气脱硝过程多组分流动与化学反应过程的耦合。采用横截面上气速的相对标准偏差 (relative standard deviation, RSD) 评价烟气分布的均匀性及其对 SCR 脱硝性能的影响程度, 其定义为:

$$R_{\text{RSD}} = \sqrt{\frac{\sum (u_i - u_m)^2}{N-1}} / u_m \quad (11)$$

式中: u_i 为特征截面样本点处烟气流速; u_m 为特征截面内烟气平均流速; N 为截面内样本点总数, 本文取值为 5 000。

计算域的空间离散方面, 采用 ICFD 将图 1 所示烟道及 SCR 反应器划分为四面体网格, 并在喷氨格栅及导流板等复杂结构附近进行网格局部加密。通过调整最大网格尺寸因子获得了数量范围为 207 万~628 万共 5 种网格进行无关性验证, 对应最大网格尺寸为 384~224 mm。以催化剂上方 0.5 m 横截面为例, 网格数量对烟气流动均匀性和 SCR 整体

脱硝性能的影响如图 2 所示。由图 2 可见: 当网格尺寸减小、四面体网格数量由 207 万增至 408 万时, SCR 烟气脱硝反应器整体脱硝效率 η 仅从 91.52% 降至 91.01%, 但烟气流速分布 R_{RSD} 值却由 17.90% 快速降至 13.82%; 随网格尺寸进一步减小、网格数量由 408 万增至 628 万时, 整体脱硝效率变化率小于 0.15 百分点, 且烟气流速分布 R_{RSD} 变化率小于 0.05 百分点。因此, 选取网格总数为 408 万作为计算网格, 对应最大网格尺寸为 288 mm。

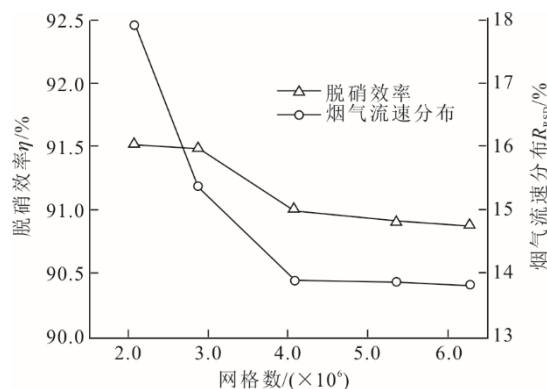


图 2 网格数量对 SCR 系统脱硝性能与流动特性的影响
Fig.2 Effect of grid numbers on denitration performance and hydrodynamics of the SCR denitration system

2 结果与讨论

2.1 脱硝性能与模型验证

对于实际运行的燃煤机组, 负荷变化会同时引起烟气流量与温度变化, 负荷降低对 SCR 烟气脱硝系统的影响主要体现在 2 个方面: 一方面为烟气量随负荷降低而减小, SCR 反应器内烟气表观气速降低, 因此 NO 与 NH_3 在催化剂层内反应停留时间增加; 另一方面反应温度随负荷降低而减小, 催化剂内反应活性降低导致 NO 催化还原反应速率降低, 不利于脱硝反应的进行。为明确 2 种机制对 SCR 烟气脱硝反应过程的影响规律, 考察了不同负荷条件下 SCR 反应器脱硝性能, 各负荷工况下运行参数见表 3。

表 3 不同负荷 SCR 烟气脱硝系统运行参数
Tab.3 Operating parameters of the SCR denitration system under various load conditions

项目	负荷/MW	$G/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	$C_{\text{NO,in}}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	NSR	T/K
设计工况	330	6.2×10^5	800.0	0.96	623
测试工况 1	300	5.1×10^5	561.9	0.93	620
测试工况 2	250	3.7×10^5	582.5	0.96	613
测试工况 3	127.5	2.4×10^5	743.6	0.97	579

注: G 为单侧烟气流量; $C_{\text{NO,in}}$ 为 SCR 脱硝入口 NO 质量浓度; NSR 为氨氮摩尔比; T 为烟气温度。

表4和表5给出了不同运行负荷工况下SCR烟气脱硝系统烟气压降 Δp 与NO脱除效率 η 的模拟值与实测值。对比可知,基于CFD模型的 Δp 和 η 预测值与实测数据吻合较好,其中 Δp 最大相对误差为9.5%, η 最大相对误差为1.4个百分点。可见,本文所建CFD模型可合理预测SCR烟气脱硝系统内多组分烟气流动特性与催化剂层内化学反应过程。

表4 SCR烟气脱硝系统压强实测值与模拟值对比
Tab.4 The measured and simulated pressure of the SCR denitration system

项目	压降 Δp		
	实测值/Pa	模拟值/Pa	相对误差/%
设计工况		877.5	
测试工况1	658.8	706.8	7.3
测试工况2	487.6	516.9	6.0
测试工况3	150.2	148.8	9.5

表5 NO脱除效率实测值与模拟值对比 单位:%
Tab.5 The measured and simulated values of NO removal efficiency

项目	NO脱除效率 η		
	实测值/%	模拟值/%	相对误差/百分点
设计工况		91.0	
测试工况1	89.7	90.5	0.8
测试工况2	94.8	93.4	1.4
测试工况3	88.1	88.6	0.5

表4、表5的结果表明,当机组负荷由330 MW降至127.5 MW时,SCR烟气脱硝系统内烟气流速减小,因此进、出口烟气压降由877.5 Pa降至148.8 Pa。对于SCR反应器脱硝性能,设计工况下(负荷330 MW)脱硝效率模拟值为91.0%,当氨氮摩尔比(NSR)不变,负荷降至250 MW时NO脱除效率升至93.4%,其原因为该工况条件下尽管烟气温度由623 K降至约613 K,烟气流速减小使得SCR反应器内表观气速由4.24 m/s降至2.52 m/s,因烟气在催化剂层停留时间增加,从而整体脱硝效率有所提高;随负荷进一步降低至127.5 MW,尽管SCR反应器内表观气速降至约1.65 m/s,烟气温度降至579 K,使得NO还原反应速率显著下降,此时脱硝效率降至约88.6%。周智健等^[23]对660 MW燃煤机组SCR烟气脱硝系统不同负荷下脱硝性能测试结果也得到类似规律。

图3为烟气温度对脱硝效率与氨逃逸量的影响。由图3可见,各工况NO初始质量浓度均为 800 mg/m^3 ,NSR为0.96,反应温度为623 K,可知随温度由633 K降至573 K,SCR反应器出口NO

质量浓度由 62.18 mg/m^3 升至 269.81 mg/m^3 ,同时 NH_3 质量浓度由 10.97 mg/m^3 升至 127.21 mg/m^3 。这是由于随温度降低NO还原反应(式(5))与 NH_3 自身氧化反应(式(6))速率下降,2种组分在SCR反应器内消耗量下降,因此在燃煤机组变负荷,尤其在低负荷运行工况下,脱硝效率显著降低,且 NH_3 逃逸量增加。

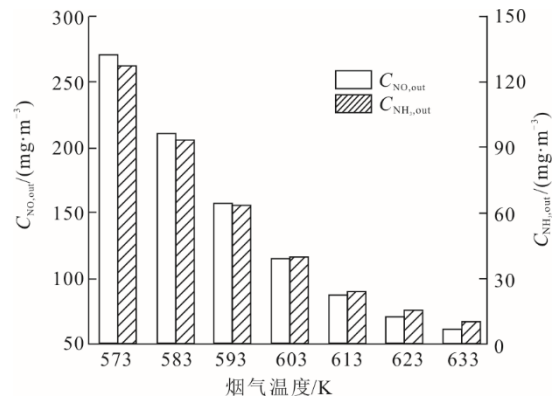


图3 烟气温度对脱硝效率与氨逃逸量的影响
Fig.3 Effect of flue gas temperature on denitration efficiency and ammonia escape amount

2.2 SCR烟气脱硝系统性能分析

分别选取3层催化剂上方0.5 m截面考察烟气流速分布特性,计算结果如图4所示。由图4可见:催化剂上方0.5 m处截面气流方向均为主流方向,轴向速度分量与合速度差别极小;催化剂层1上方0.5 m处xy截面内上下两侧均出现高速带,同时下侧高于上侧流速,最高可达约5.0 m/s,该截面烟气流速分布相对标准偏差约为14%;因催化剂层1对烟气流动的调控作用,使得气速分布更为均匀,催化剂层2与催化剂层3来流烟气流速相对标准偏差均在10%以下。

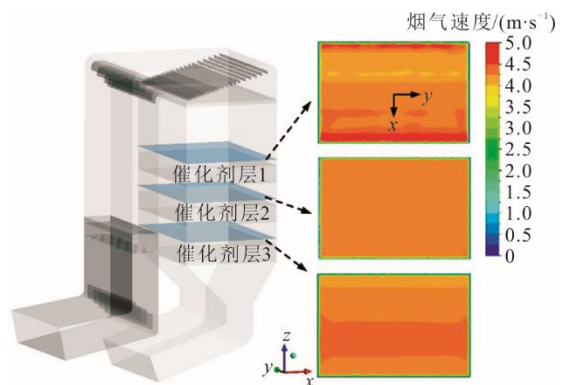


图4 SCR反应器内催化剂层上方烟气流速特性
Fig.4 The characteristics of flue gas flow over catalyst layer in the SCR reactor

在 NO 初始质量浓度 800 mg/m^3 , NSR 为 0.96, 反应温度 623 K 条件下, SCR 烟气脱硝系统 zx 截面以及经过催化剂层后 xy 截面 NO 质量浓度分布如图 5 所示。由图 5 可知: 烟气经过催化剂层后 NO 质量浓度下降, 其中烟气经过催化剂层 1 后 NO 质量浓度下降最为显著, 由 800 mg/m^3 降至约 318 mg/m^3 , 其原因为催化剂反应过程反应物质量浓度较高; 经过催化剂层 3 后 NO 质量浓度降至约 74 mg/m^3 ; 由 xy 截面 NO 质量浓度分布特性可知, 近壁面区域 NO 质量浓度较高而中心区域较低, 其原因为近壁区域烟气与还原剂混合不充分, 导致 SCR 烟气脱硝反应过程反应物质量浓度较低。

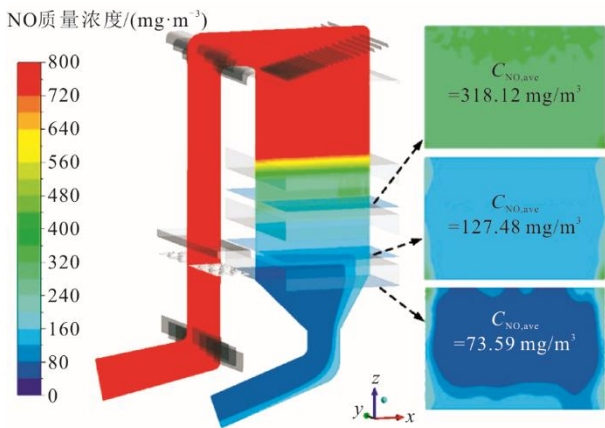


图 5 SCR 反应器内 NO 质量浓度分布特性
Fig.5 Distribution of NO mass concentration in the SCR reactor

图 6 给出了 SCR 烟气脱硝系统 zx 截面以及 3 层催化剂层来流截面 NH_3 质量浓度分布。

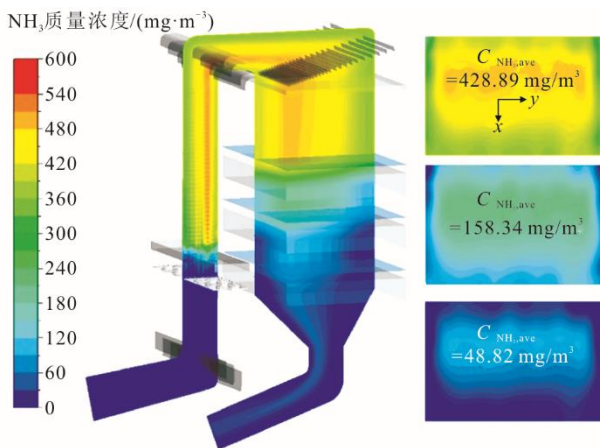


图 6 SCR 反应器内 NH_3 质量浓度分布特性
Fig.6 Distribution characteristics of NH_3 mass concentration in the SCR reactor

由图 6 可知, 近壁区域 NH_3 质量浓度较低, 中

心区域质量浓度较高。该分布特性与图 5 所示 NO 质量浓度分布相对应, 催化剂层内 SCR 烟气脱硝过程 NO 与 NH_3 质量浓度匹配性较差。这是由于喷氨格栅来流烟气速度分布不均导致烟气与还原剂混合效果较差, 因此需调控烟气流动特性, 强化烟气与还原剂混合, 以提高 SCR 反应器脱硝性能。

2.3 喷氨格栅烟气来流均布优化

通过 SCR 烟气脱硝系统烟气流动特性以及 NO 和 NH_3 质量浓度分布特性, 发现 SCR 烟气脱硝过程反应物混合不均主要由烟气-还原剂混合不均引起。为强化烟气与 NH_3 混合, 本文针对近壁区 NH_3 质量浓度偏低, 喷氨格栅烟气来流速度分布不均现象提出如图 7 所示优化方案。该方案通过在喷氨格栅 AIG 喷嘴上方近壁区域设置导流构件 (AIG 挡板), 缓解局部烟气逃逸, 并将导流板 I 调整为 1 组弧形导流板, 其中原设计方案下 AIG 上游转折烟道内为竖直导流板, 转折烟道倒角曲率半径 R_0 为 500 mm 。

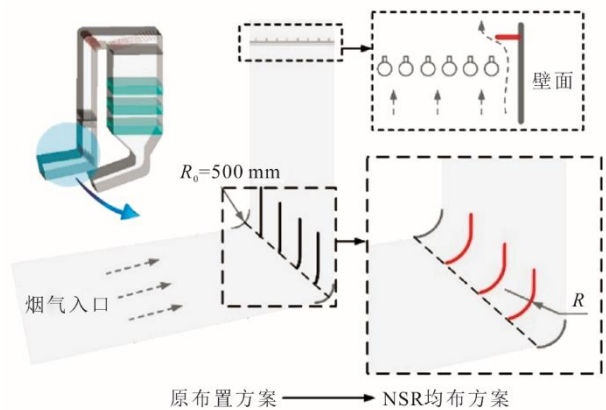


图 7 导流板 I 结构与 NH_3 均布优化方案示意
Fig.7 The structure of deflector I and the optimization scheme for NH_3 distribution

以原设计方案为基准工况, 通过对比工况 A-1 (设置 AIG 挡板)、A-2 (设置 AIG 挡板及 $R=800 \text{ mm}$ 弧形导流板)、A-3 (设置 AIG 挡板及 $R=500 \text{ mm}$ 弧形导流板) 与 A-4 (设置 AIG 挡板及 $R=300 \text{ mm}$ 弧形导流板), 考察导流构件对 SCR 反应器脱硝效率的影响, 并寻找适宜结构参数。

图 8 为原设计方案及不同优化方案下催化剂来流截面内 NSR 分布特性。选取首层催化剂上方 0.5 m 为特征截面, 计算条件为 NO 初始质量浓度 800 mg/m^3 , NSR 为 0.96, 反应温度 623 K 。由图 8 可见: 增设 AIG 挡板后 (工况 A-1) 有利于提高近壁区域 NH_3 质量浓度, 但烟道中心区域 NSR 较高,

其原因是 AIG 上游烟道转折处流速不均导致烟气与还原剂混合效果较差；当垂直导流板（原始方案）调整为弧形导流板（工况 A-2—工况 A-4）后可有效提高 NH_3 质量浓度在烟道截面的整体分布均匀性。

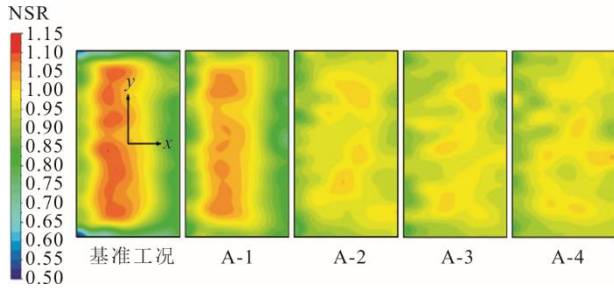


图 8 不同优化方案下催化剂 1 上方 xy 截面 NSR 分布特性
Fig.8 The distribution characteristics of NSR in plane xy above the catalyst 1 in different optimization schemes

为定量考察不同导流构件对 NH_3 与烟气混合效果以及 SCR 反应器脱硝性能影响，图 9 给出了不同优化方案下 NO 脱除效率与催化剂上方 0.5 m 截面内 NSR 相对标准偏差。由图 9 可见：增设 AIG 挡板后（工况 A-1） $R_{\text{RSD}}\text{-NSR}$ 由原设计方案对应的 10.31% 降至 7.70%， NH_3 分布均匀性提高将 NO 脱除效率由 91.01% 升至 91.75%；当导流板 I 调整为弧形导流板后，工况 A-2 ($R=800$ mm) 对应 NSR 分布 R_{RSD} 值进一步下降至 3.82%、同时脱硝效率升至 93.26%，随弧形导流板曲率半径 R 减小，NSR 分布均匀性与 NO 脱硝效率变化较小；对比发现工况 A-3 ($R=500$ mm) 条件下，烟气与还原剂混合效果较好，对应脱硝效率为 93.38%。

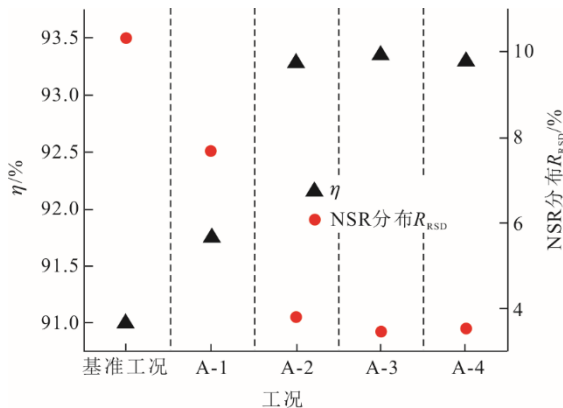


图 9 不同优化方案下脱硝效率与 NSR 分布特性
Fig.9 The denitration efficiency and distribution characteristics of NSR in different optimization schemes

图 10 为不同优化方案下 NO 排放质量浓度与 SCR 脱硝系统进出口烟气压降。由图 10 可知：增

设 AIG 挡板后（工况 A-1）NO 排放质量浓度由 71.93 mg/m^3 降至 65.99 mg/m^3 ；而将导流板 I 调整为 $R=500$ mm 弧形导流板（工况 A-3）后 NO 排放质量浓度进一步降至 52.95 mg/m^3 。烟气压降影响是 SCR 脱硝系统运行能耗的重要指标之一。增设 AIG 挡板后（工况 A-1）使得近壁面区域局部扰动增强，烟气压降略有上升；而调整为弧形导流板（工况 A-2 至 A-4）后，烟气压降由 887.5 Pa 降至约 840 Pa 。这是因为相比于原设计方案，弧形导流板具有更好的流型调控能力。

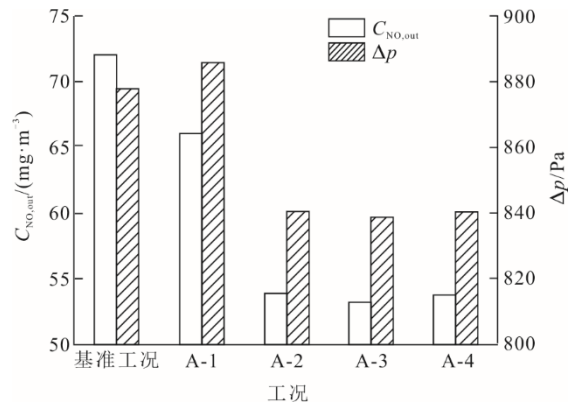


图 10 不同优化方案下 NO 出口质量浓度与烟气压降
Fig.10 The NO mass concentration at gas outlet and the pressure drop of flue gas in different optimization schemes

以工况 A-3 为例，图 11 给出了优化前后导流板 I 处气速。

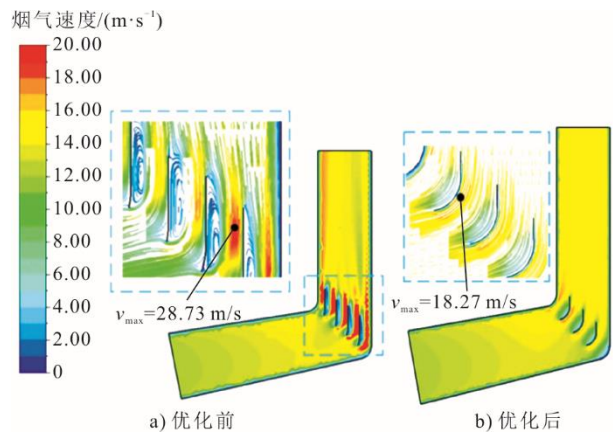


图 11 原设计方案与 A-3 优化方案下导流板 I 处对烟气流动特性
Fig.11 The hydrodynamics of flue gas around the Vane-I in the original and A-3 schemes

由图 11 可见：原设计方案采用的导流板布置，可在一定程度提高来流均匀性，但导流板背风侧形成规模较大的旋涡同时烟气的有效同流截面积减小形成高速区，这一现象明显提高了烟气的压力损

失；导流板直段迎风侧均存在明显高速区，其中流速最高点出现于最右侧导流板，优化方案下流场内流速最高点均低于 20 m/s，导流板处未出现明显高速冲刷。Shang 等人^[19]在对带有弧形导流板 SCR 反应器模拟中也得到类似结论。

2.4 NO 质量浓度及 NSR 的影响

图 12 为原设计方案与优化方案 A-3 工况下 NO 初始质量浓度对 NO 和 NH₃ 排放质量浓度的影响。由图 12 可见：各计算工况 NSR 均为 0.96，可知 NO 和 NH₃ 排放质量浓度均随初始 NO 质量浓度增大而提高；采用 A-3 优化方案后还原剂利用率提高，可将原设计方案 NO 排放质量浓度 38~71 mg/m³ 降至 25~53 mg/m³，同时可将 NH₃ 排放质量浓度由 9.1~16.1 mg/m³ 降至 4.3~6.1 mg/m³。超低排放标准下 NO_x 排放限制为 50 mg/m³，原设计方案下达到该标准需要 NO 初始质量浓度低于 550 mg/m³，而优化方案可将其提高至约 700 mg/m³，提高了 SCR 脱硝系统对负荷与煤种的适应性。

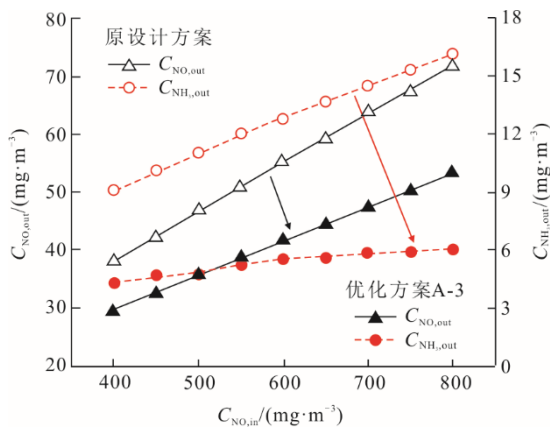


图 12 NO 初始质量浓度对脱硝效率与氨逃逸质量浓度影响
Fig.12 Effect of initial NO mass concentration on denitration efficiency and ammonia escape mass concentration

HJ 562—2010^[27]中规定氨逃逸质量浓度宜小于 2.5 mg/m³，而由图 12 可见不同工况下模拟结果均存在较多未反应的还原剂，导致难以满足氨逃逸标准。因此，需进一步考察 NSR 对脱硝效率与 NH₃ 逃逸量的影响。

图 13 与图 14 分别给出了在优化方案 A-3 工况，初始 NO 质量浓度 450~700 mg/m³ 条件下 NSR 对 NO 与 NH₃ 排放质量浓度的影响。由图 13 可知，随 NSR 增大 NO 排放质量浓度逐渐降低，然而随还原剂喷射量增大 SCR 反应器整体脱硝效率提升效果逐渐减弱。以 NO 排放质量浓度 50 mg/m³ 为限制，NO 初始质量浓度为 700 mg/m³ 时 NSR 不应低

于 0.95；对于 NH₃ 排放特性，氨逃逸量随 NSR 提高而快速增大，当 NSR 低于 0.95 时不同 NO 质量浓度条件下氨逃逸量差异较小。以 HJ 562—2010^[27]中所规定氨逃逸量 2.5 mg/m³ 为限制，通过模拟结果分析得到 SCR 烟气脱硝系统设计工况下 NSR 不应高于 0.94。综合考虑 SCR 烟气脱硝系统脱硝性能与氨逃逸量，应控制 SCR 烟气脱硝系统来流烟气中 NO 质量浓度同时合理调整喷氨量，针对本文所选取 SCR 烟气脱硝装置，设计工况下入口烟气中 NO 质量浓度应控制在 650 mg/m³ 以下，且 NSR 约为 0.94 时可以提高还原剂利用率。

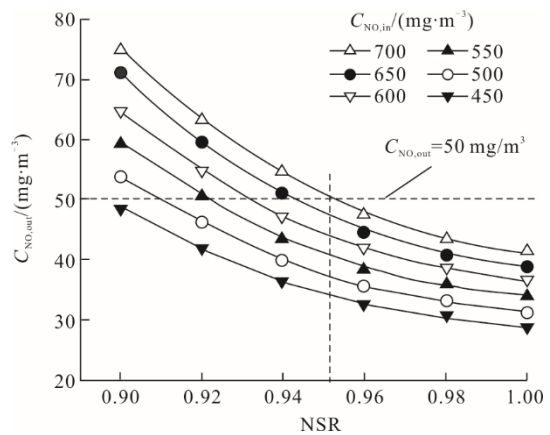


图 13 NO 初始质量浓度与 NSR 对 NO 排放质量浓度的影响
Fig.13 Effect of initial NO mass concentration and NSR on NO emission mass concentration

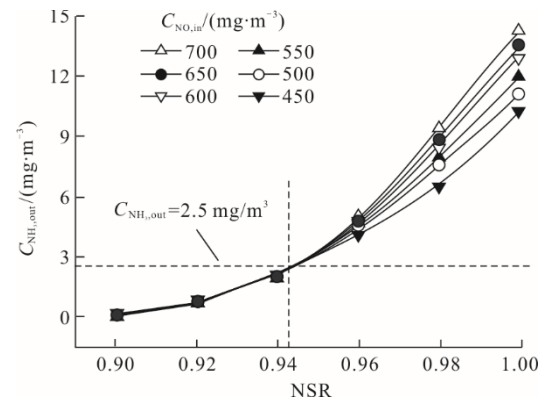


图 14 NO 初始质量浓度与氨氮摩尔比 NSR 对 NH₃ 排放质量浓度的影响
Fig.14 Effect of initial NO mass concentration and NSR on NH₃ emission mass concentration

3 结 论

基于 CFD 数值模拟方法考察了 SCR 烟气脱硝系统内多组分烟气流动与脱硝反应过程，分析了机组负荷、反应温度、NO 初始质量浓度、喷氨量等操作条件对脱硝性能的影响，主要结论如下。

1) SCR 反应器内烟气流动的非均匀性对其脱硝性能具有一定影响。催化剂来流截面内烟气流速分布相对标准偏差约为 14%，经首层催化剂层后流速偏差低于 10%。喷氨格栅来流烟气速度分布不均导致烟气与还原剂混合效果较差，使得近壁面区域 NO 质量浓度较高而中心区域较低，导致 SCR 烟气脱硝反应过程反应物质量浓度较低。

2) 通过对比 38.6% 至 100% BMCR 负荷条件下 SCR 烟气脱硝系统烟气压降与 NO 脱除效率模拟值与实测值，验证了本文 CFD 模型对于多组分烟气流动与催化剂层内化学反应过程预测的可靠性。模拟结果表明：当负荷由 330 MW 降至 250 MW 时反应停留时间增大，脱硝效率由 91.0% 升至 93.4%；随负荷进一步降低至 127.5 MW，烟气温度下降至 579 K，使得 NO 还原反应速率显著下降，脱硝效率下降至约 88.6%。

3) 通过增设喷氨格栅可加强近壁面区域烟气与氨气混合效果，同时将喷氨格栅上游烟气转折处垂直挡板调整为弧形挡板后，有效提高氨氮摩尔比分布均匀性。对比不同方案获得了最优工况下脱硝效率相比原设计方案提高约 3.37%，同时烟气压降减少约 40 Pa。

4) 综合考虑 NO 质量浓度与喷氨量对 SCR 烟气脱硝效率与氨逃逸量的影响，为满足 NO_x 小于 50 mg/m³ 和 NH₃ 氨逃逸量为 2.5 mg/m³ 的排放限值，以本文选取的 330 MW 燃煤机组 SCR 烟气脱硝装置为例，设计工况下烟气中初始 NO 质量浓度应低于 650 mg/m³，当氨氮摩尔比为 0.94 时可以满足 NO 和 NH₃ 排放限值。

【参考文献】

- [1] 张军, 郑成航, 张涌新, 等. 某 1 000 MW 燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1310-1314.
ZHANG Jun, ZHENG Chenghang, ZHANG Yongxin, et al. Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a 1 000 MW coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1310-1314.
- [2] 史文峥, 杨萌萌, 张绪辉, 等. 燃煤电厂超低排放技术路线与协同脱除[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4308-4318.
SHI Wenzheng, YANG Mengmeng, ZHANG Xuhui, et al. Ultra-low emission technical route of coal-fired power plants and the cooperative removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4308-4318.
- [3] SADEGHI F, TIRANDAZI B, KHALILI-GARAKANI A, et al. Investigating the effect of channel geometry on selective catalytic reduction of NO_x in monolith reactors[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 118: 21-30.
- [4] 李军状, 杨勇平, 朱法华, 等. SCR 高脱硝效率燃煤发电机组逃逸氨分布特性实测研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3447-3453.
LI Junzhuang, YANG Yongping, ZHU Fahua, et al. Actual measurement study on escaped ammonia distribution with SCR high denitration efficiency of coal-fired unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3447-3453.
- [5] 何陆灿, 葛铭, 陈国庆, 等. 火电厂 SCR 脱硝系统喷氨优化调整[J]. 热力发电, 2019, 48(11): 129-134.
HE Lucan, GE Ming, CHEN Guoqing, et al. Optimization of ammonia-injection in SCR denitration system of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11): 129-134.
- [6] 田原润, 马剑宇. 1 000 MW 机组烟气脱硝系统烟道流场优化[J]. 热力发电, 2018, 47(6): 50-56.
TIAN Yuanrun, MA Jianyu. Flue flow field optimization of flue gas denitration system in 1 000 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(6): 50-56.
- [7] 李晗天, 宋蕾, 姚强. SCR 反应器入口速度与氨分布不均匀性对脱硝性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2599-2606.
LI Hantian, SONG Qiang, YAO Qiang. Influence of non-uniform distributions of inlet velocity and reductant on SCR deNO_x performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2599-2606.
- [8] 于飞, 赖慧龙, 郭律, 等. 钒基催化剂 NH₃-SCR 低温反应特性研究[J]. 内燃机学报, 2021, 39(1): 74-80.
YU Fei, LAI Huilong, GUO Lü, et al. Performance of SCR catalysts based on V₂O₅-WO₃/TiO₂ at low temperature[J]. Transactions of CSICE, 2021, 39(1): 74-80.
- [9] LIETTI L, NOVA I, CAMURRI S, et al. Dynamics of the SCR-deNO_x reaction by the transient-response method[J]. AIChE Journal, 1997, 43(10): 2559-2570.
- [10] 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.
SHEN Boxiong, ZHAO Ning, LIU Ting. Mathematical simulation of flue gas denitration based on selective catalytic reduction catalyst[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(8): 31-37.
- [11] PINOY L J, HOSTEN L H. Experimental and kinetic modelling study of deNO_x on an industrial V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalyst[J]. Catalysis Today, 1993, 17: 151-158.
- [12] WILLI R, RODUIT B, KOEPEL R A, et al. Selective reduction of NO by NH₃ over vanadia-based commercial catalyst: parametric sensitivity and kinetic modeling[J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(11): 2897-2902.
- [13] ODENBRAND C, BAHAMONDE A, AVILA P, et al. Kinetic study of the selective reduction of nitric oxide over vanadia-tungsta-titania/sepiolite catalyst[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1994, 5: 117-131.
- [14] KOEBEL M, ELSENER M. Selective catalytic reduction of NO over commercial deNO_x-catalysts: experimental determination of kinetic and thermodynamic parameters[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(4): 657-669.
- [15] SCHAUB G, UNRUH D, WANG J, et al. Kinetic analysis of selective catalytic NO_x reduction (SCR) in a catalytic filter[J]. Chemical Engineering and Processing, 2003, 42(5): 365-371.

- [16] 范红梅, 仲兆平, 金保升, 等. $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂氨法 SCR 脱硝反应动力学研究[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(3): 377-380.
FAN Hongmei, ZHONG Zhaoping, JIN Baosheng, et al. Kinetics study of the selective catalytic reduction of NO with NH_3 over $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ catalyst[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(3): 377-380.
- [17] DHANUSHKODI S R, MAHINPEY N, WILSON M. Kinetic and 2D reactor modeling for simulation of the catalytic reduction of NO_x in the monolith honeycomb reactor[J]. Process Safety and Environment Protection, 2008, 86(4): 303-309.
- [18] 樊庆铎, 王明轩, 关心, 等. 某燃煤电厂 300 MW 机组 SCR 烟气脱硝装置结构优化[J]. 化工进展, 2014, 33(10): 2806-2814.
FAN Qingxin, WANG Mingxuan, GUAN Xin, et al. Optimal design of a SCR-de NO_x system for a 300 MW coal-fired power plant[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(10): 2806-2814.
- [19] SHANG D, LI B, LIU Z. Large eddy simulation of transient turbulent flow and mixing process in an SCR denitration system[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 141: 279-289.
- [20] 王海川, 曾祥浩, 廖艳芬, 等. SCR 系统流场优化数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 147-153.
WANG Haichuan, ZENG Xianghao, LIAO Yanfen, et al. Numerical simulation of flow field optimization in SCR system[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(4): 147-153.
- [21] XU Y, ZHANG Y, WANG J, et al. Application of CFD in the optimal design of a SCR-de NO_x system for a 300 MW coal-fired power plant[J]. Computers and Chemical Engineering, 2013, 49(1): 50-60.
- [22] 凌忠钱, 曾宪阳, 胡善涛, 等. 电站锅炉 SCR 烟气脱硝系统优化数值模拟[J]. 动力工程学报, 2014, 34(1): 50-56.
LING Zhongqian, ZENG Xianyang, HU Shantao, et al. Numerical simulation on optimization of SCR denitrification system for coal-fired boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(1): 50-56.
- [23] 周智健, 王信, 常剑, 等. 660 MW 燃煤电厂 SCR 脱硝系统 CFD 模拟优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6688-6698.
ZHOU Zhijian, WANG Xin, CHANG Jian, et al. CFD simulation and optimization of SCR de NO_x system in a 660 MW coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6688-6698.
- [24] 周英贵, 金保昇. 基于非均匀入口条件的 SCR 氨喷射方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 121-126.
ZHOU Yinggui, JIN Baosheng. Ammonia injection method for SCR based on non-uniform inlet condition[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 121-126.
- [25] 李壮扬, 苏乐春, 宋子健, 等. 660 MW 燃煤机组 SCR 流场模拟优化与喷氨优化运行[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(4): 47-52.
LI Zhuangyang, SU Lechun, SONG Zijian, et al. Optimization of flow and ammonia injection by numerical simulation of SCR for a 660 MW coal-fired unit[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 47-52.
- [26] 谢新华. 在役 SCR 催化剂失活机理及运行管理优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 1.
XIE Xinhua. Study on the deactivation mechanism and optimization in operation management over SCR catalysts[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 1.
- [27] 火电厂烟气脱硝工程技术规范选择性催化还原法: HJ 562—2010[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 4.
Engineering technical specification of flue gas selective catalytic reduction denitration for thermal power plant: HJ 562—2010[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010: 4.

(责任编辑 杨嘉蕾)