烧结烟气 SCR 脱硝过程数值模拟及结构优化

黄德巍，尹晓春，海 坤，丁怀平，高 程，刘隆健
（南京理工大学 物理学院，江苏 南京 210094）

摘要：为减少铁矿烧结过程中 NO_x 等有害气体排放并解决某钢厂 SCR 反应器脱硝效率低的问题，本文采用 Fluent 软件对 SCR 反应器内流场和脱硝反应过程进行数值模拟，分析反应器内气流流动和均匀性、脱硝氨气与 NO_x 的混合度和脱硝效率，找出该 SCR 反应器脱硝效率低的原因，随后依据数值分析结果设计优化方案，并对优化方案进行有限元建模分析。结果表明：优化方案对烟气发挥显著整流作用，可改善烟气流速的均匀性，使催化层上方和靠近反应器内侧流动死区的范围有所降低，流速的相对标准偏差由 29.8% 降低至 7.14%；第一层催化剂上方氨气进入脱硝塔内的均匀程度得到提升，氨氮浓度比的相对标准偏差由 22.3% 降低至 4.7%，进而使 NO 脱除率从 48% 提升至 73%，达到国家排放标准要求。

关键词：烧结；SCR 脱硝；数值模拟；导流板；喷氨模式
中图分类号：X701.7；TP311.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)06－0137－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.100

Numerical simulation and structural optimization of SCR denitrification process of sintering gas

HUANG Dewei, YIN Xiaochun, HAI Kun, DING Huaiping, GAO Cheng, LIU Longjian
(School of physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: In order to reduce the emission of NO_x and other harmful gases in the process of iron ore sintering and solve the problem of low denitrification efficiency of SCR reactor in a steel mill, a Fluent software is used to numerically simulate the flow field and denitrification reaction process in the SCR reactor, the flow and uniformity of the gas flow in the reactor, the mixing degree of denitrification ammonia and NO_x, and the denitrification efficiency are analyzed, the reasons for the low denitrification efficiency of the SCR reactor are found out, and then the optimization scheme is designed according to the numerical analysis results, and the finite element modeling analysis is carried out on the optimization scheme. The results show that the optimized scheme has a significant rectification effect on the gas, which can improve the uniformity of the gas velocity, reduce the range of the flow dead zone above the catalytic layer and close to the reactor inside, and reduce the relative standard deviation of the flow velocity from 29.8% to 7.14%. The uniformity of ammonia gas entering the denitrification tower above the first layer catalyst is improved, and the standard deviation of the ammonia nitrogen concentration ratio is reduced from 22.3% to 4.7%, and the NO removal efficiency is increased from 48% to 73%, which met the requirements of the national emission standard.

Key words: sintering; SCR denitrification; numerical simulation; deflector; ammonia spray mode

钢铁工业是国民经济的基础产业和现代化建设的重要支撑。烧结工序是钢铁冶炼过程不可或缺的关键工序，然而，烧结过程产生的烟气中污染物质量浓度高、排放量大且种类多[1-2]。其中，

收稿日期：2024－08－30；**修回日期：**2024－09－12
基金项目：国家自然科学基金资助项目(12002164)；江苏省自然科学基金资助项目(BK20190432)
作者简介：黄德巍(1999—)，男，硕士研究生，从事流体动力学工程应用方面的研究。
通信作者：尹晓春(1963—)，男，博士，教授，从事工程力学性能和结构可靠性方面的研究。

NO_x 是烧结工序中的主要污染物之一，会极大危害生态环境与人体健康[3]。为降低 NO_x 的排放量，目前钢铁行业已对烧结机配套建设硫硝脱除系统，达到超低排放目标，并实现人与自然协调和可持续发展[4]。选择性催化还原(selective catalytic reduction，SCR)作为一种常用 NO_x 治理方法，已经被广泛研究和应用于高温烟气的脱硝过程[5]。该技术在催化剂的作用下，促进高温烟气中的 NO_x 与还原剂(通常是氨或尿素)进行反应，生成无害的氮气和水，以减少 NO_x 的排放[6]。

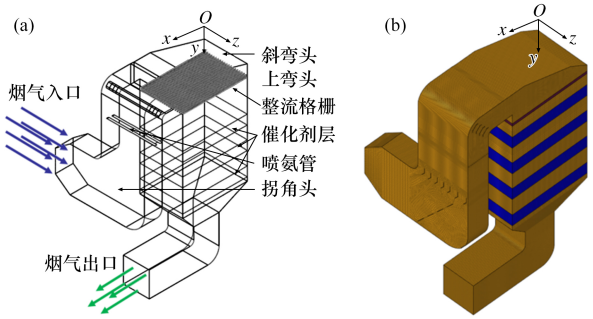
当前，国内外众多学者采用理论分析、数值模拟以及试验测试等手段，对 SCR 反应器治理 NO_x 展开了深入探究与剖析。如，WILHITE[7] 运用计算流体动力学(CFD)方法对 SCR 脱硝反应器内流场分布进行了模拟研究，优化改进了 SCR 脱硝装置的烟道，并提出在烟道拐角处应尽可能采用圆弧过渡。在导流板设计领域，沈丹等[8] 以某燃煤机组的 SCR 脱硝系统为基础，开展了导流板形状的研究工作，通过对直板、弧度板和弧度直板这三种不同形式导流板下反应器内的流场分布情况进行研究，最终得出弧度直板是较为合理的导流板形式，为脱硝系统内的导流设计和改进提供了重要参考。孙雪峰等[9] 对 350 MW 机组锅炉 SCR 脱硝系统进行研究，优化改造了脱硝反应器内部各处的导流板，而且在易产生积灰的部位增设了声波吹灰器，使烟气流场相对标准偏差降为 5%，使液氨消耗量在相同负荷下降低了 45%，彻底解决了脱硝系统积灰和空气预热器堵塞的问题，实现了机组满负荷、稳定运行的目标。周帅[10] 以某 600 MW 燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统作为研究对象，基于组分输运模型和层流有限速率模型，对反应器内化学反应过程进行了数值模拟。模拟结果显示，优化喷氨方式能够提高催化剂上游氨氮分布的均匀性，进而提升脱硝效率并减少氨逃逸。张焱等[11] 也通过优化喷氨模式，显著提高了喷氨管道和喷氨孔内氨气流量的均匀性。

本文通过数值模拟方法，深入分析 SCR 反应器内流场特性和脱硝反应过程，揭示其内在规律，并在对脱硝塔精准建模的基础上提出在拐角处增加导流板提前进行整流，以及改变喷氨模式的优化方案；通过数值模拟验证优化方案的可行性和效果，以期为 SCR 技术的进一步发展和应用提供有益参考，为 NO_x 的控制和减排做出积极贡献。

1 有限元模型

1.1 流体域几何模型

根据某钢厂的 SCR 装置原型，本文模拟的 SCR 脱硝反应器模型示意如图 1(a)所示。为了突出重点，该脱硝装置不设置烟气旁路系统，主要由反应舱、整流格栅、烟道、催化剂层、导流板和喷氨管等构成，其中，催化剂层数布置采取“2 +1”布置，即初装 2 层、预留 1 层。为了保证对 SCR 反应器脱硝过程数值模拟的计算精度，采用结构化六面体网格对 SCR 装置进行网格划分。该反应器模型结构较为复杂，其整体网格模型如图 1(b)所示。



(a) 结构模型；(b) 有限元模型

图 1 SCR 脱硝反应器的几何模型

Fig. 1 Geometric model of the SCR denitration reactor

1.2 物理模型

在数值模拟时，对该脱硝系统做出如下近似假设和简化：① 假设系统密封，且流动为定常流动；② 忽略灰尘的影响，只考虑烟气的主要组分；③ 将整流格栅与催化剂层视为多孔介质模型；④ 化学反应只发生在催化剂层，忽略反应放热，并只考虑主反应；⑤ 烟气的各组分与还原剂气体认为是理想气体。

考虑到 SCR 烟气脱硝系统内流动介质有多种气体成分以及流动中物质的混合情况，选择标准的 k-epsilon 湍流模型建模[12]。考虑在重力的影响下烟气与周围环境之间的换热，采用组分输运模型模拟多组分烟气之间的流动换热。

湍流动能 k 方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k v_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_m+S_k \tag{1}$$

式中：ρ 为流体密度，kg/m^3；k 为湍流动能，m^2/s^2；t 为时间，s；v_i 为速度 v 在 i 方向（i = 1、2、3，分别对应 x、y、z 方向）的分量，m/s；x_i、x_j 为空间坐标分量，m；μ 为流体的动力黏度，kg/(m·s)；μ_t 为湍流黏性系数，kg/(m·s)；σ_k 为方程的湍流普朗特数，无量纲；G_k 为由平均速度梯度引起的湍流动能，kg/(m·s^3)；G_b 为浮力导致的湍流动能的增加量，kg/(m·s^3)；ε 为耗散项，m^2/s^3；Y_m 为可压缩湍流中的波动扩散分布，kg/(m·s^3)；S_k 为自定义源项。

湍流动能耗散率方程：

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon v_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_s}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+B_{1s}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+B_{3s}G_b)-B_{2s}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_s \tag{2}$$

式中：σ_s 为方程的湍流普朗特数；B_{1s}、B_{2s}、B_{3s} 为常量，分别取 1.44、1.92、0.09；S_s 为自定义源项。

根据前文所述，整流格栅及催化剂层采用多孔介质模型。当为多孔介质模型时，动量方程增加一个动量源项，它由黏性损失项和惯性损失项两部分组成。采用细部结构模型模拟整流格栅和催化剂层的整体结构，并根据实际孔隙率大小模拟烟气流过时的压降，计算整流格栅以及催化层多孔介质模型的物理参数，即惯性阻尼系数和黏性阻尼系数[13]。其表达公式：

$$S_i=-\left(\sum_{j=1}^{3}\boldsymbol{D}_{ij}\mu v_j+\sum_{j=1}^{3}\boldsymbol{C}_{ij}\frac{1}{2}\rho|v|v_j\right) \tag{3}$$

式中：S_i 为 i 方向的动量源项；$\boldsymbol{D}_{ij}$为规定矩阵 $\boldsymbol{D}$ 中的系数，代表黏性损失项，$\boldsymbol{C}_{ij}$为规定矩阵 $\boldsymbol{C}$ 中的系数，代表惯性损失项；j 分别对应 x、y、z 方向，取值 1、2、3。

选择好数学模型后，采用 Fluent 软件对 SCR 脱硝过程进行数值模拟。在模拟中采用速度入口的边界条件，如表 1 所示。模拟中，采用烟道入口尺寸和烟气流量计算脱硝塔及喷氨管进口附近的风速。由于烧结烟气的风量是在标况下计算，根据理想气体状态方程以及脱硝塔内温度情况，可知实际的入口风速较理论值更高（修正后烧结烟气入口的平均风速为 21.2 m/s）。

表 1　烧结烟气入口参数

Table 1　Inlet parameters of sintering flue gas

标况下入口烟气流量/(m^3·h^{-1})	标况下入口氨气流量/(m^3·h^{-1})	入口烟气温度/K	入口氨气温度/K
350 000	2 650	665	340

1.3　流场均匀性指标

考虑实际生产工况的变化，本文采取确定的烟气量和温度（665 K），根据烟气量相应调整喷氨量。根据《燃煤电厂 SCR 烟气脱硝流场模拟技术规范》（DL/T 1418—2015），定义相对标准偏差（RSD）。

$$\sigma_{RSD}=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_i-X_0)^2/(N-1)}}{X_0}\times 100\% \tag{4}$$

式中：σ_{RSD}为相对标准偏差，%；X_i 为单点 i 的测量值；X_0 为所有测点的算术平均值；N 为测点数量。

根据《火力发电厂烟气脱硝设计技术规程》（DL/T 5480—2013），第一层催化剂上游烟气分布要求如表 2 所示。

表 2　现行评价指标

Table 2　Current evaluation index

相对标准偏差/%			烟气最大温度差值/℃	氨逃逸质量浓度/(mg·m^{-3})
催化剂上方速度	氨、氮浓度比	催化剂上方氨浓度		
15	5	5	10	30

注：氨氮浓度比即反应器内 NH_3 与 NO 的物质的量之比。

1.4　化学反应

SCR 烟气脱硝指的是在一定温度和催化剂的作用下，利用还原剂氨（NH_3）与烟气中的NO_x和氧气进行化学反应，将烟气中的NO_x还原为N_2和H_2O。其主要化学反应[14]如下。

$$4NH_3+4NO+O_2=4N_2+6H_2O \tag{5}$$

$$4NH_3+4NO+3O_2=4N_2O+6H_2O \tag{6}$$

$$4NH_3+5O_2=4NO+6H_2O \tag{7}$$

$$4NH_3+3O_2=2N_2+6H_2O \tag{8}$$

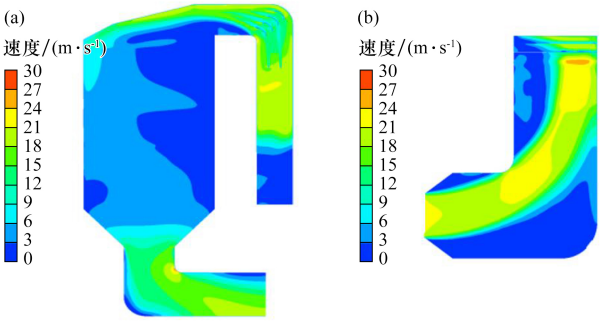
经典 SCR 脱硝反应主要进行式(5)，N_2 中的氮原子源自 NO 和 NH_3[15]。鉴于烧结烟气中 NO 占比高达 90% 以上，因此，本文不考量 NH_3 与烟气中 NO_2 的还原反应，仅聚焦于 NO 与 NH_3 之间的化学反应。这样能够直接体现系统的脱硝率，且计算结果在工程方面可被接受。

2 结果与讨论

2.1 优化前数值模拟

2.1.1 流场及脱硝反应过程

为了分析此种情况下的速度场、氨氮浓度比分布，对脱硝反应器内烟气流动进行数值模拟。在未优化前，SCR 脱硝反应器仅包括进出口烟道、喷氨格栅和催化剂层。优化前的速度场分布情况如图 2 所示。



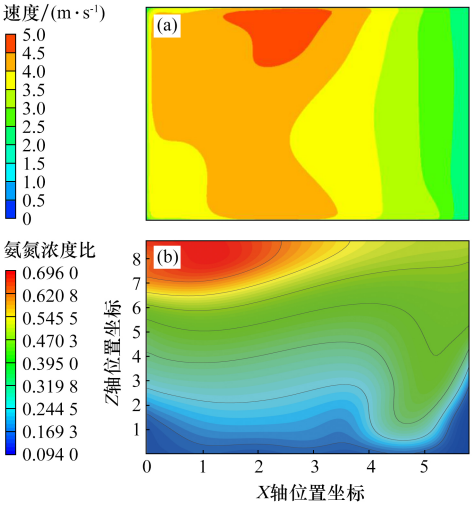
(a) 纵向截面；(b) 入口处侧面

图 2 优化前 SCR 脱硝反应器的速度分布

Fig. 2 Velocity distribution of SCR denitration reactor before optimization

由图 2 可见，烧结烟气由反应器入口进入，经过拐角后，与喷氨管喷出的氨气相遇，并随着气流沿反应器竖直管道方向运动而逐渐被混合均匀。在经过拐角的过程中，气流运动的速度较均匀，在烟道末尾处速度变大，约为 22.3 m/s。到达上弯头时，由于流入的惯性，烟气向烟道中远离入口处的一侧壁面聚集，在转角处的速度急剧增加并出现了气流的扭转，最大速度达 24.6 m/s，而上弯头靠近入口处的一侧出现大片的流动死区，此处气流速度为 0 ~ 6 m/s，即几乎无气流通过。转弯后，气流经过斜弯头进入反应器，呈现出远离上弯头一侧的流速较大，另一侧流速几乎为零的分布情况。此时，高低速区的分界明显，大量流动死区造成反应器内空间严重浪费，且流场分布明显不均。

第一层催化剂入口处速度场如图 3(a)所示。由图 3(a)可见，此处速度分布并不均匀，在靠近脱硝反应器入口侧速度较小，约为 2.6 m/s；远离脱硝反应器入口侧速度较大，约为 4 m/s，最大速度可达 4.8 m/s；中间位置的速度略大于远离入口外侧位置的速度，约为 5 m/s。取该截面主要反应区域所有单元节点的速度值以及氨氮浓度比值，由式(4)计算得到第一层催化剂入口处速度的相对标准偏差为 29.8%，氨氮浓度比偏差为 22.3%，进入第一层催化层的烟气流速范围为 1.8 ~ 5.0 m/s，此时速度的均匀性差，不满足设计要求。



(a) 速度分布；(b) 氨氮浓度比

图 3 优化前第一层催化剂入口数值模拟(纵向截面)

Fig. 3 Numerical simulation of the first layer catalyst inlet before optimization

在 SCR 系统中，氨氮浓度比与流场分布联系紧密。一旦烟气流场分布不均匀，第一层催化剂入口处的氨氮浓度比分布将失衡，进而使得 SCR 出口氨逃逸量增多，生成的硫酸氢铵易缩短空预器正常的运行周期。第一层催化剂入口截面的氨氮浓度比分布如图 3(b)所示。选取该截面主要反应区域所有单元节点的氨气和 NO 浓度值进行运算，得出该截面氨氮浓度比处于 0.17 至 0.64 之间，偏差为 0.47，氨氮浓度比相对标准偏差为 22.3%，不符合脱硝率低于 85% 时相对标准偏差不宜大于 5.0% 的国家标准要求。

2.1.2 模型准确性验证

为验证该模型可信度，测量该机组在优化前

工况下 SCR 烟气脱硝系统的进出口烟道的流动阻力、出口温度分布与出口速度，计算此系统的进出口压降、出口温度与出口流速，结果如表 3 所示。对比表 3 结果可知，模拟数据与试验数据较吻合，模拟的速度场与化学反应能够比较准确地反映系统的实际运行情况。

表 3　模拟数据与试验数据比较

Table 3　Comparison between the simulated data and the experimental data

项目	压降/Pa	出口温度/K	出口风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
试验数据	357.3	508.3	346 403
模拟数据	369.0	523.8	350 000
相对误差/%	3.275	3.049	1.038

2.2　优化设计方案与结果分析

2.2.1　优化设计方案

对优化前的 SCR 脱硝反应器流场及脱硝反应过程进行数值模拟，分析可知，由于烟道内部缺少导流装置且喷氨管道数量过少，烟气在烟道内与管道内壁碰撞后，会出现旋流、扭转或涡流等现象。因内部流场混乱，高速气流易在烟道内部聚集，致使流场均匀性欠佳，进而使得氨气在进入第一层催化剂床层之前无法与 NO_x 充分混合。

为解决这一问题，对导流板进行如下改进(图 4)：① 在烟气入口拐角头以 45°设置 4 块长度为 1 m、厚度为 2 cm 的“斜”形导流板；② 在拐角头与烟道交接处水平布置 7 块“斜－直”形导流板，其中，斜板倾角为 45°，斜、直板长度均为 1 m，厚度均为 2 cm。此外，将喷氨管设计为喷氨格栅，并进行以下改进(图 5)：① 在原喷氨管处增加 23 根直径为 4 cm 的喷氨管；② 将喷氨管分上、下两层依次错开排列(第一层 12 根，第二层 11 根)，同时将喷氨模式由圆柱上半面喷出调整为从两侧喷出。

经过上述改进后，分别对增设导流板与改变喷氨格栅之后 SCR 反应器的脱硝过程进行数值模拟。结果显示，增设导流板和改变喷氨格栅这两种措施对于 NO_x 的脱除均起到关键作用。具体而言，增设导流板可使脱硝率提升 19%，改变喷氨格栅能让脱硝率提高 14%。因此，优化设计方案全部采纳这两项优化措施。

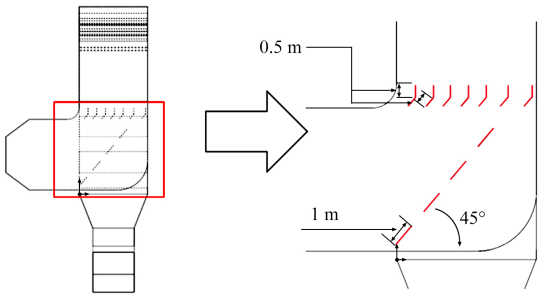
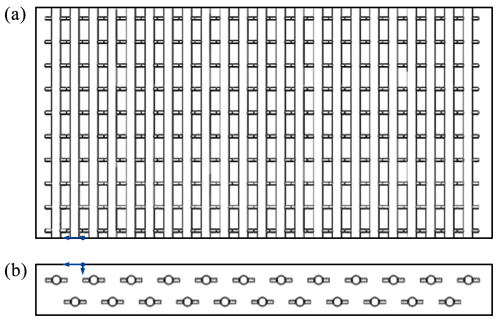


图 4　入口烟道的优化

Fig. 4　Optimization of inlet flue



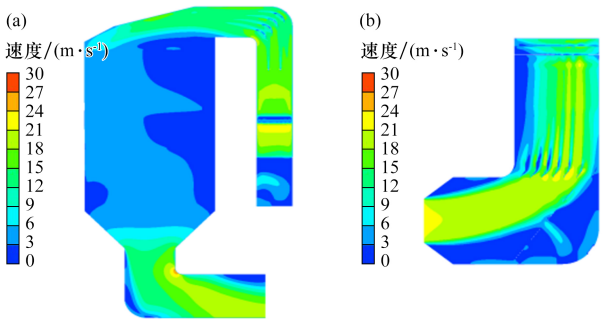
(a) 俯视图；(b) 主视图

图 5　喷氨模式的优化

Fig. 5　Optimization of ammonia injection mode

2.2.2　优化结果分析

改进后，重新建模并进行单元划分。结构优化后的模型计算结果如图 6 所示。由图 6 可见：在流场均匀性方面，烟气由反应器入口进入后，由于导流板的存在，气流在经过拐角头后的惯性减弱，使得在喷氨管处烟气靠近入口一侧烟道的流动死区大幅减小，外侧转角处的速度也有所降低，由原来的 24.6 m/s 降低至 19.0 m/s，此处烟气流速的均匀性保证了烟气与氨气的充分混合均匀。斜弯头内的流场也受到了导流装置的影响，



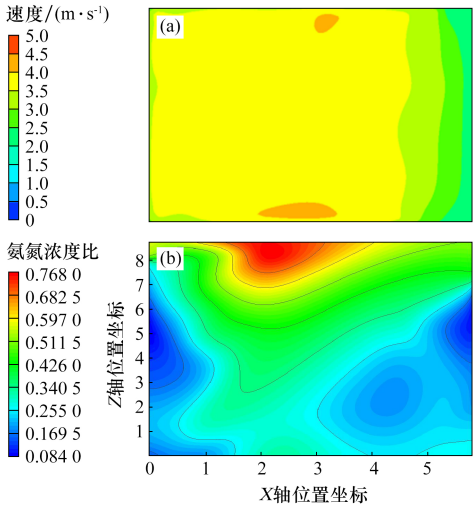
(a) 纵向截面；(b) 入口处侧面

图 6　优化设计后的速度分布

Fig. 6　Velocity distribution of SCR denitration reactor after optimized design

使进入格栅的大部分烟气都保持速度均匀。整流格栅使上方扰动气体的流速变得均匀，同时也大幅减小了催化层上方、靠近反应器内侧的烟气流动死区，使烟气能够均匀进入催化剂层进行脱硝反应。

第一层催化剂入口截面的烟气流速分布如图 7(a)所示。模拟结果表明，增加导流装置后，混合气体流场变得均匀。烟气经格栅整流后，进入第一层催化层的流速减小到 2.5 ~ 4.5 m/s，截面中间与四周的流速差距极大改善，整流效果明显。取第一层催化剂入口截面上主要反应区域所有单元节点的速度值进行计算，得到第一层催化剂入口处速度相对标准偏差降低至 7.14%，满足相对标准偏差小于 15.0% 的国家标准。



(a) 速度分布；(b) 氨氮浓度比

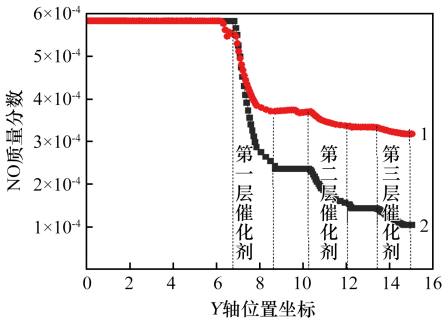
图 7 优化设计后第一层催化剂入口数值模拟(纵向截面)

Fig. 7 Numerical simulation of the first layer catalyst inlet after optimized design (longitudinal section)

在氨氮浓度比均匀性方面，第一层催化剂上方水平截面的氨氮浓度比分布如图 7(b)所示。当喷氨模式由圆柱上半面喷出改为由两侧喷出时，NH_3浓度相对标准偏差大幅降低，这是由于水平喷射时，NH_3会最大程度分散开，同时NH_3与烟气流动方向正交，其能够更好地混合并分散在整个烟气流中。氨气随着烟气流动到反应器的各个位置，最终到达催化剂位置时已充分混合，其流速的均匀性也得到一定的改善。取该截面上主要反应区域所有单元节点的速度值以及氨气和 NO 浓度值进行计算，得到第一层催化剂入口处截面氨氮浓度比为 0.24 ~ 0.60，相对标准偏差由原来的 0.47 缩小至 0.36，氨氮浓度比相对标准偏差由原来的 22.3% 减小至 4.7%，满足在脱硝率低于 85% 时，相对标准偏差不宜大于 5.0% 的国家标准。

2.3 脱硝率的改善

基于前文针对优化前、后的 SCR 脱硝系统流场以及脱硝反应过程所开展的数值模拟工作，将图 1 中的直角坐标系设定为基础坐标系，进而获取 SCR 脱硝反应舱在 Y 轴方向上不同截面的平均 NO 质量分数分布状况，并据此绘制图 8。计算结果表明，优化前后的 NO 脱除都主要发生在三层催化剂位置，其中在第一层催化剂处，化学反应最为剧烈，经过该层催化剂后烟气中 NO 质量分数大大降低。



1—优化前；2—优化后。

图 8 NO 质量分数分布

Fig. 8 Distribution of NO mass fraction

优化前、后的数值模拟结果如表 4 所示。由表 4 可见，通过增设导流板以及改变喷氨方式，第一层催化剂上方的速度及氨氮浓度比的相对标准偏差得到优化，该位置的反应物混合均匀性得到改善。这一优化增大了反应物在催化剂层的接触面积，显著提升了反应器的脱硝率。

表 4 脱硝系统脱硝数据

Table 4 Denitration data of denitration system

项目	相对标准偏差/%		NO 脱除率/%
	流速	氨氮浓度比	
国家要求	15.0	5.0	—
优化前	29.8	22.3	48
优化后	7.14	4.7	73

3　结　论

（1）SCR 脱硝反应器优化的速度场分布不均匀，有大量流动死区，造成空间浪费和流场不均匀。第一层催化剂入口处速度场以及氨氮浓度比分布同样不均，导致氨逃逸量偏高，不符合国家标准。

（2）增设导流板以及调整喷氨模式能够对烟气发挥整流作用，在烟气流速均匀性改善方面效果显著。增设导流板之后，相比优化前，新方案大幅减小了催化层上方、靠近反应器内侧的流动死区，使烟气能够均匀进入催化剂层进行脱硝反应。

（3）增设导流板以及调整喷氨模式能够优化氨气进入脱硝塔内的均匀程度，使第一层催化剂上方的氨氮混合程度得以提升。相较于优化前，第一层催化层上方的氨氮浓度比的相对标准偏差从 29.8% 降低至 22.3%。主要通过降低氨氮浓度比的相对标准偏差这一途径，使 NO 脱除率从 48% 提升至 73%。

参考文献：

[1] 汤铃，贾敏，伯鑫，等. 中国钢铁行业排放清单及大气环境影响研究[J]. 中国环境科学，2020，40(4)：1493－1506.
TANG Ling，JIA Min，BO Xin，et al. High resolution emission inventory and atmospheric environmental impact research in Chinese iron and steel industry[J]. China Environmental Science，2020，40(4)：1493－1506.

[2] 刘孟玥. 钢铁行业烧结烟气处理工艺生命周期多目标集成评价研究[D]. 济南：山东大学，2021.
LIU Mengyue. Research on life cycle multi-objective integrated evaluation of sintering flue gas treatment process in the iron and steel industry[D]. Jinan：Shandong University，2021.

[3] ABIÁN M，PERIBÁÑEZ E，MILLERAÁ，et al. Impact of nitrogen oxides（NO，NO_2，N_2O）on the formation of soot[J]. Combustion and Flame，2014，161(1)：280－287.

[4] 刘静波. 烧结机烟气脱硫脱硝工程内容及难点研究[J]. 南方农机，2018，49(10)：125.
LIU Jingbo. Study on the content and difficulty of flue gas desulfurization and denitrification project of sintering machine[J]. China Southern Agricultural Machinery，2018，49(10)：125.

[5] MI J，DAN A，HASKEW T. CFD applications on selective catalytic NO_x reduction(SCR) system[C]//Proceedings of the 4th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference. New York：American Society of Mechanical Engineers，2003：2139－2146.

[6] TRONCONI E. Interaction between chemical kinetics and transport phenomena in monolithic catalysts[J]. Catalysis Today，1997，34(3/4)：421－427.

[7] WILHITE D C. The use of computational fluid dynamics (CFD) in selective catalytic reduction system ductwork design[C]//Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division. New York：The American Society of Mechanical Engineers，1998：247－248.

[8] 沈丹，仲兆平，过小玲. 600 MW 电厂 SCR 烟气脱硝反应器内不同导流板的流场数值模拟[J]. 电力环境保护，2007，23(1)：42－45.
SHEN Dan，ZHONG Zhaoping，GUO Xiaoling. Numerical simulation of different guide plates in selective catalytic reduction denitrification reactor of 600 MW power plant[J]. Electric Power Environmental Protection，2007，23(1)：42－45.

[9] 孙雪峰，王强，颜世剑，等. 350 MW 机组锅炉 SCR 脱硝系统优化[J]. 洁净煤技术，2020，26(1)：221－227.
SUN Xuefeng，WANG Qiang，YAN Shijian. Optimization of SCR denitrification system for 350 MW unit boiler[J]. Clean Coal Technology，2020，26(1)：221－227.

[10] 周帅. 某 600 MW 燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统提效改造与飞灰捕集研究[D]. 南京：东南大学，2020.
ZHOU Shuai. Efficiency-improving reform for SCR flue gas denitrification system of 600 MW coal-fired units and research on the capture of fly ash[D]. Nanjing：Southeast University，2020.

[11] 张焱，刘健，刘进武. SCR 喷氨管道及喷氨孔布置对流量均匀性的影响[J]. 能源与节能，2022(7)：91－94；164.
ZHANG Yan，LIU Jian，LIU Jinwu. Effect of SCR ammonia injection pipes and hole layout on flow uniformity[J]. Energy and Energy Conservation，2022(7)：91－94，164.

[12] CHEN M，ALEIXO J，WILLIAMS S，et al. CFD modeling of 3-way catalytic converters with detailed catalytic surface reaction mechanism[J]. Sae Technical Paper，2004，148：25228.

（下转第 154 页）

YAO Lu, LIU Qingcai, FANG Shihui, et al. Oxidation modification of semi-dry desulfurization ash from sintering flue gas[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(6):3147 – 3151.

[19] WU Q,YOU R R,CLARK M,et al. Pb(II) removal from aqueous solution by a low-cost adsorbent dry desulfurization slag[J]. Applied Surface Science,2014,314:129 – 137.

[20] 贾明生,刘高珍,张乾熙,等. 球团脱硫灰中主要杂质组分对脱硫性能影响研究[J]. 当代化工,2022,51(4):882 – 886.
JIA Mingsheng, LIU Gaozhen, ZHANG Qianxi, et al. Influence of main impurity components in pellet desulfurization ash on desulfurization performance[J]. Contemporary Chemical Industry,2022,51(4):882 – 886.

[21] 张响飞. Na_2CO_3,Na_2SO_4 和 NaCl 混合物溶解动力学研究[D]. 西宁:中国科学院大学,2017.
ZHANG Xiangfei. Dissolution kinetics of salt mixture (Na_2CO_3 + Na_2SO_4 + NaCl) in pure water[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes Chinese Academy of Sciences,2017.

[22] 李锦时,吕娜,耿莹莹. 钙钠耦合半干法脱硫影响因素实验研究[C]//第二十一届大气污染防治技术研讨会论文集. 杭州:中国环境科学学会,2017:89 – 94.
LI Jinshi,LÜ Na,GENG Yingying. Experimental study on the influencing factors of calcium-sodium coupled semi-dry desulfurization[C]//Proceedings of the 21st Symposium on Air Pollution Control Technology. Hangzhou: Chinese Society of Environmental Sciences, 2017:89 – 94.

[23] 马双忱,于伟静,贾绍广,等. 燃煤电厂脱硫废水处理技术研究与应用进展[J]. 化工进展,2016,35(1):255 – 262.
MA Shuangchen, YU Weijing, JIA Shaoguang, et al. Research and application progresses of flue gas desulfurization(FGD) wastewater treatment technologies in coal-fired plants[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2016,35(1):255 – 262.

[24] 刘艳,焦晓峰,温高. 湿法烟气脱硫机理分析探讨[J]. 热力发电,2006,35(1):25 – 27;33.
LIU Yan, JIAO Xiaofeng, WEN Gao. An approach to mechanism analysis of wet flue gas desulfuration[J]. Thermal Power Generation,2006,35(1):25 – 27;33.

[25] 马双忱,别璇,黄星,等. 基于中温烟气多污染物控制的烟气脱硫实验[J]. 化工进展,2018,37(增刊1):205 – 212.
MA Shuangchen, BIE Xuan, HUANG Xing, et al. Desulfurization Experiment analysis based on control of multiple pollutants in flue gas at medium temperature [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2018,37(Suppl 1):205 – 212.

[26] 李丽君,张强,刘平,等. 火电厂烟气脱硫石膏重金属含量监测与分析[J]. 水土保持学报,2015,29(2):209 – 214.
LI Lijun, ZHANG Qiang, LIU Ping, et al. Survey and analysis of heavy metals in FGD gypsum from coal-fired power plants[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(2):209 – 214.

(上接第128页)

China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co.,Ltd. Handbook of industrial and civil power supply and distribution design[M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press,2016:10 – 19.

[12] 张松波. 我国金属矿山碳排放现状及降碳路径探讨[J]. 冶金经济与管理,2022(4):8 – 11.
ZHANG Songbo. Carbon emission status and carbon reduction path of metal mines in China[J]. Metallurgical economy and management,2022(4):8 – 11.

(上接第143页)

[13] 海坤,尹晓春,刘隆键,等. 烧结烟气SCR脱硝系统流场模拟及导流结构优化[J]. 低碳化学与化工,2023,48(4):89 – 95.
HAI Kun, YIN Xiaochun, LIU Longjian, et al. Sintered flue gas SCR denitrification system flow field simulation and inflow structure optimization[J]. Natural Gas Chemical Industry,2023,48(4):89 – 95.

[14] BOSCH H, JANSSEN F. Catalytic reduction of nitrogen oxides: A review on the fundamentals and technology [J]. ChemInform,1988,2(4):198831346.

[15] 李晓芸,赵毅,王修彦. 火电厂有害气体控制技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
LI Xiaoyun, ZHAO Yi, WANG Xiuyan. Harmful gas control technology in thermal power plant[M]. Beijing: China Water & Power Press,2005.