

SCR外置烟道飞灰沉积特性与流场优化数值仿真

李凯^{1,2}, 章平衡¹, 孟志浩¹, 曹允宁¹, 徐尧¹, 刘莉¹, 李廉明^{1*}

(1. 嘉兴新嘉爱斯热电有限公司, 浙江省 嘉兴市 314016; 2. 浙江大学能源工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Numerical Simulation of Fly Ash Deposition Characteristics and Flow Field Optimization for SCR External Flue

LI Kai^{1,2}, ZHANG Pingheng¹, MENG Zhihao¹, CAO Yunning¹, XU Yao¹, LIU Li¹, LI Lianming^{1*}

(1. Jiaxing New Jies Thermal Power Co., Ltd., Jiaxing 314016, Zhejiang Province, China; 2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

摘要: 【目的】选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)脱硝因脱硝效率高,运行可靠等优点,被广泛应用于锅炉烟气脱硝,然而高灰布置下脱硝烟气尚未进行除尘处理,烟气中的飞灰会使催化剂堵塞并对其产生磨损。为减轻飞灰颗粒对选择性催化还原催化剂的磨损与堵塞,设计并研究了SCR外置烟道对烟气中的飞灰颗粒进行捕集分离。【方法】基于仿真软件及其用户定义函数功能,开展了SCR外置烟道飞灰沉积特性与流场优化的数值仿真。【结果】烟气流速从1 m/s上升至2 m/s时,飞灰沉积率由24.0%下降至1.88%,随着流速的增大,飞灰沉积率快速下降;50 μm 以下飞灰颗粒难以被捕集,但随着飞灰粒径的增大,飞灰沉积率快速上升,飞灰被SCR外置烟道捕集,脱硝反应器入口流速分布极为不均;在流场分析的基础上,提出脱硝反应器入口流场优化方案,通过导流板的优化设计改善了流场分布,使脱硝反应器入口的速度不均匀系数从93.7%下降至14.7%。【结论】研究结果可为SCR外置烟道现场运行提供可靠的理论指导。

关键词: 燃煤电厂; 锅炉烟气; 选择性催化还原(SCR); 飞灰沉积; 流场优化; 数值模拟

ABSTRACT: [Objectives] Selective catalytic reduction (SCR) denitrification is widely used in denitrification of boiler flue gas due to its high denitrification efficiency and reliable operation. However, under high-ash arrangements, the denitrification flue gas has not yet been de-treated, and fly ash in the flue gas will block the catalyst and cause wear on it. In order to reduce the wear and clogging of fly ash particles on

SCR catalysts, an SCR external flue is designed and studied to trap and separate fly ash particles in flue gas. [Methods] Based on simulation software and its user defined function, numerical simulation of fly ash deposition characteristics and flow field optimization for SCR external flue is carried out. [Results] When the flue gas flow rate increases from 1 to 2 m/s, the fly ash deposition rate decreases from 24.0% to 1.88%. Therefore, as the increase of flow rate, the fly ash deposition rate decreases rapidly. It is difficult to trap fly ash particles below 50 μm . However, with the increase of the fly ash particle size, the fly ash deposition rate increases rapidly, and the fly ash is trapped by the SCR external flue. The flow velocity distribution at the inlet of the denitrification reactor is extremely uneven. Based on the flow field analysis, an optimization plan for the flow field at the inlet of the denitrification reactor is proposed. The flow field distribution is improved through the optimized design of the guide plate, and the velocity unevenness coefficient at the inlet of the denitrification reactor is reduced from 93.7% to 14.7%. [Conclusions] The research results may provide reliable theoretical guidance for the field operation of SCR external flue.

KEY WORDS: coal-fired power plants; boiler flue gas; selective catalytic reduction (SCR); fly ash deposition; flow field optimization; numerical simulation

0 引言

人类的社会与生产活动带来了大量的污染物排放,造成地球生态环境的破坏。其中,燃煤发电生产过程是污染物排放的主要来源之一^[1-2]。2015年出台的《全面实施燃煤电厂超低排放和节

基金项目: 浙江省科技计划项目(2021C03164)。

Project Supported by the Science and Technology Plan of Zhejiang Province (2021C03164).

能改造工作方案》要求全国具备改造条件的燃煤电厂力争在2020年实现氮氧化物排放浓度不高于 50 mg/m^3 。选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)脱硝因脱硝效率高,运行可靠等优点,已成为应用最为广泛的锅炉烟气脱硝手段^[3-5]。

为匹配SCR催化剂的最佳反应温度区间,SCR脱硝装置往往采用高灰布置^[6-7]。在这种系统中,脱硝烟气尚未进行除尘处理,烟气中的飞灰会使催化剂堵塞并对其产生磨损^[8]。首先,大颗粒飞灰(毫米级)尺寸较大,流经催化剂时可能卡在入口通道,形成局部堵塞。在烟气流速较低的区域,烟气中的细小飞灰将被连续捕集,极易导致催化剂通道的板结。飞灰对催化剂的磨损能力与飞灰颗粒粒径、硬度等密切相关,因此大颗粒飞灰对催化剂造成的机械破坏尤为强烈,致使其使用寿命大幅缩短^[9]。其次是微米级的细小飞灰颗粒,其常沉积于防护金属格栅上,逐步累积进而引起催化剂通道的积灰与堵塞^[10]。无论粒径大小,脱硝反应器入口流场的不均都会加剧飞灰颗粒对催化剂的磨损。不均匀的流场会使得局部流速过大,此时磨损速率快速升高,加速催化剂的破损^[11]。飞灰颗粒在催化剂积灰堵塞后,催化剂前后压差快速上升,从而大幅增加引风机的能耗,严重时甚至会使引风机偏离最佳性能曲线而引起喘振,迫使机组进行停炉清灰^[12]。另外,催化剂通道的积灰堵塞减少了烟气与催化剂的接触面积,降低了脱硝效率^[13]。为保障 NO_x 排放值不超限,大幅提高喷氨量,然而又导致氨逃逸超标严重。氨逃逸率增加不仅会使催化剂表面覆盖硫酸氢铵或硫酸铵而导致催化剂中毒,还会造成下游空预器的积灰与腐蚀^[14-15]。此外,细小飞灰颗粒中含有的碱/碱土金属元素和重金属元素会与催化剂或烟气反应,抑制 NH_3 的吸附与氧化,使得钒系催化剂失去活性^[16-17]。

为减轻飞灰颗粒对SCR催化剂的磨损与堵塞,设计了SCR外置烟道对烟气中的飞灰颗粒进行捕集分离。然而,SCR外置烟道的飞灰沉积特性尚未明确,现场运行缺少可靠的理论指导。同时,需要对SCR外置烟道改造后的脱硝反应器入

口流场进行理论分析,以保障入口流场的均匀性。基于上述现状,本文开展SCR外置烟道飞灰沉积特性与流场优化的数值模拟,总结归纳飞灰颗粒粒径与烟气流速对飞灰沉积率的影响规律,在流场分析的基础上,提出脱硝反应器入口流场优化方案,提高入口流场的均匀性。

1 模型描述与数值方案

1.1 物理模型

原设计方案中,SCR催化剂床层布置于竖井烟道中,烟气经省煤器后竖直流过SCR催化剂,布置方案如图1所示。此时,烟气的含尘量较高,容易引起严重的SCR催化剂磨损与堵塞。为减轻飞灰颗粒对SCR催化剂的磨损与堵塞,设计了SCR外置烟道,烟道结构如图2所示。烟气首先从竖井烟道引出,经惯性分离折角后进入水平段外置烟道。随后含尘烟气流经惯性分离弯头改变

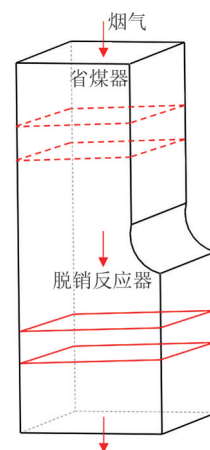


图1 原SCR催化剂布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the original SCR catalyst layout

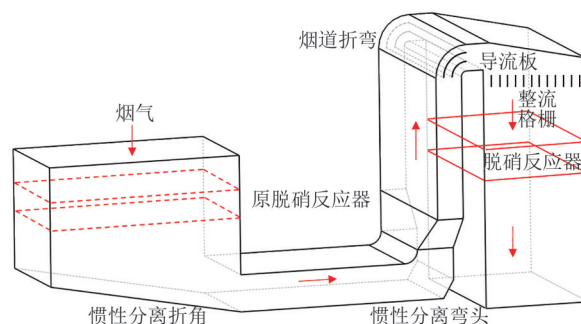


图2 SCR外置烟道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SCR external flue

烟气流向,进入上行段外置烟道。在惯性的作用下,部分烟气中的飞灰未能跟随烟气改变流向而被分离,分离出的飞灰通过弯头处的排灰口排出。除尘后的烟气经第2个折弯进入布置有脱硝反应器的下行烟道,脱硝后的烟气将返回原烟道与空预器进行热交换。取图2所示SCR外置烟道作为计算区域,并按实际尺寸进行建模。

SCR外置烟道出口烟气温度约300℃,其物理性质按标准烟气进行计算。烟气中飞灰密度取1840 kg/m³,质量流量为4.4×10⁻³ kg/s。烟气流速将在1~2 m/s变化,飞灰粒径取值为50~250 μm,以此来分析SCR外置烟道的飞灰沉积特性与流场分布。烟气和飞灰颗粒的参数详见表1。

表1 烟气和飞灰颗粒参数

Tab. 1 Parameters of flue gas and fly ash particles

参数	数值
烟气流速/(m/s)	1~2
烟气密度/(kg/m ³)	0.617
烟气黏度/(Pa·s)	2.82×10 ⁻⁵
飞灰颗粒粒径/μm	50~250
飞灰密度/(kg/m ³)	1840
飞灰质量流量/(kg/s)	4.4×10 ⁻³

1.2 数学模型

1.2.1 离散相模型

由于飞灰颗粒在烟气中占据的体积分数极低,可忽略颗粒与颗粒之间的相互作用。颗粒作为离散相,在拉格朗日参考系下,颗粒的运动轨迹可以通过颗粒上作用力的平衡关系式的积分进行预测。颗粒作用力平衡的关系式如下:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{18\mu C_d(\vec{u} - \vec{u}_p)Re_p}{24\rho_p d_p^2} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + \vec{F}_t \quad (1)$$

式中: t 为时间, s; $\vec{u}$ 为流体相速度, m/s; $\vec{u}_p$ 为颗粒速度, m/s; μ 为流体的动力黏度, kg/(m·s); ρ_g 为流体密度, kg/m³; ρ_p 为颗粒密度, kg/m³; d_p 为颗粒直径, m; $\vec{g}$ 为重力加速度, m/s²; $\vec{F}_t$ 为其他作用力, N/kg; Re_p 为颗粒雷诺数; C_d 为阻力系数。

Re_p 和 C_d 的表达式分别为:

$$Re_p = \frac{\rho_g d_p |\vec{u} - \vec{u}_p|}{\mu} \quad (2)$$

$$C_d = (a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2}) f_r(K_n) \quad (3)$$

式中: a_1 、 a_2 和 a_3 是应用于不同 Re_p 范围的常系数,由Morsi和Alexander^[18]给出; $f_r(K_n)$ 为考虑气相稀薄性的修正因子。

作用在颗粒上的其他力还包括热泳力、扩散泳力、Saffman升力以及压力梯度力等。但是本文研究颗粒为微米级以上颗粒,且流动过程中不进行热质交换,因此上述作用力很小,完全可以忽略不计^[19]。

1.2.2 飞灰沉积模型

飞灰颗粒与壁面发生碰撞后,若变形阶段储存的弹性势能小于恢复阶段的黏附能,则颗粒黏附于管壁^[20]。具体计算公式为

$$Q_{el} + Q_{pe} \leq Q_{A,r} + 10.41r^4 \left(\frac{E^* \zeta^5}{F^4} \right)^{1/3} \quad (4)$$

式中: Q_{el} 为极限弹性势能, J; Q_{pe} 为储存的塑性变形能, J; $Q_{A,r}$ 为黏附能, J; $Q_{A,a}$ 为入射颗粒与换热管壁之间的引力作用引起的表面黏附能, J; r 为颗粒-壁面碰撞时的接触半径, m; F 为颗粒-壁面碰撞时的接触载荷, N/m²; E^* 为颗粒的等效杨氏模量, Pa; ζ 为颗粒的表面能, J/m²。

结合颗粒-壁面碰撞过程中的法向能量守恒,可获得颗粒黏附的临界法向速度^[21]:

$$Q_{in,n} + Q_{A,a} = Q_{el} + Q_{pe} + Q_p \quad (5)$$

$$\begin{cases} Q_{in,n} = \frac{1}{2} m_p v_{in,n}^2 \\ Q_{A,a} = \pi \zeta (r_{el}^2 + \frac{F - F_{el}}{\pi y}) \\ Q_{el} = \frac{\pi^5 d_p^3 y^5}{480 E^*} \\ Q_{pe} = \frac{1}{2} h_{el} (F - F_{el}) \\ Q_p = \frac{(F - F_{el})^2}{2\pi d_p y} \end{cases} \quad (6)$$

$$v_{n,cr} = \sqrt{\frac{Q_{A,r} - Q_{A,a} + Q_p}{1/2 m_p}} \quad (7)$$

式中: $Q_{in,n}$ 为入射颗粒的法向动能, J; Q_p 为颗粒塑性变形引起的能量损失, J; m_p 为颗粒的质量, kg; y 为弹性载荷极限, N; r_{el} 、 h_{el} 和 F_{el} 分别为极限弹性变形条件下的接触半径、颗粒渗透距离以及接触载荷; $v_{n,cr}$ 为颗粒黏附的临界法向速度, m/s;

$v_{in,n}$ 为入射颗粒的法向速度, m/s。

式(6)中, 唯一未知量为 F , 其值可通过与 Q_{pc} 的另一形式计算式进行联立求解^[22]:

$$Q_{pc} = \frac{1}{2} \left(\frac{15m_p \phi^2}{8} \right)^{1/2} \left[(2m_p v^2 - \frac{1}{8} m_p \phi^2)^{1/2} - \left(\frac{15m_p \phi^2}{8} \right)^{1/2} \right] \quad (8)$$

式中: v 为颗粒速度, m/s; ϕ 为极限弹性速度, 其详细的表达式可参考文献^[22]。

对于切向黏附, 采用颗粒切向动能与脱离接触所需最小能量之间的能量平衡导出的临界入射角作为黏附准则^[23]:

$$\tan \theta_{cr} = \frac{\mu^*}{(32\beta^3)^{1/2}} \sqrt{\frac{E^*}{G^*}} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{4r^3}{3F} \left(\frac{9\pi\zeta d_p^2}{E^*} \right)^{-1/3} \quad (10)$$

式中: θ_{cr} 为颗粒的临界入射角, ($^\circ$); μ^* 为有效摩擦系数; Pa; G^* 为颗粒的有效剪切模量, Pa; β 为有效接触半径系数。

根据上述分析, 颗粒-壁面碰撞的黏附准则可归纳为:

1) 当 $\theta \leq \theta_{cr}$ 且 $v_{in,n} \leq v_{n,cr}$ 时, 入射颗粒黏附于壁面。

2) 当 $\theta > \theta_{cr}$ 或 $\theta \leq \theta_{cr}$ 且 $v_{in,n} > v_{n,cr}$ 时, 入射颗粒与壁面碰撞后发生反弹。

如果入射颗粒在碰撞后反弹, 则反弹速度可以分别用法向和切向恢复系数^[24]来计算:

$$e_n = \frac{v_{re,n}}{v_{in,n}} = \sqrt{1 - \frac{Q_p + (Q_{A,r} - Q_{A,a})}{1/2 m_p v_{in,n}^2}} \quad (11)$$

$$e_t = \frac{v_{re,t}}{v_{in,t}} = 1 - \mu^* (1 + e_n) \frac{C_m}{1 + C_m} \frac{v_{in,n}}{v_{in,t}} \quad (12)$$

式中: e_n 和 e_t 分别为颗粒反弹速度的法向和切向恢复系数; $v_{in,n}$ 和 $v_{in,t}$ 分别为入射颗粒的法向和切向速度, m/s; $v_{re,n}$ 和 $v_{re,t}$ 分别为颗粒反弹后的法向和切向速度, m/s; C_m 为比例因子。

1.3 数值模型与计算方法

SCR外置烟道内的含尘烟气两相流动过程采用数值仿真软件进行稳态模拟。对图1所示的计算域进行网格划分, 通过分块法划分了六面体网格。在满足所选壁面函数的应用要求, 对数值结果进行了网格无关性验证后, 最终确定网格数量

为3 180 170。

启用因适量计算负荷而广泛应用于工程计算的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型与Realizable壁面函数。烟气采用标准烟气, 烟气的密度与黏度被定义为温度的多项式函数。烟气入口采用速度入口边界条件, 出口采用压力出口边界条件。颗粒的释放方式为面入射, 离散随机游走模型被用来预测湍流弥散作用。利用宏函数在壁面边界条件中考虑颗粒-壁面碰撞过程。压力-速度耦合采用SIMPLE算法。除了 $k-\varepsilon$ 湍流方程采用一阶迎风格式外, 其余控制方程的空间离散均采用二阶迎风格式。

1.4 模型可靠性验证

为验证颗粒沉积模型的可靠性, 以文献^[23]中的管束式换热器积灰工况为对比, 进行模型验证。验证工况中烟气流速范围为5~10 m/s, 飞灰粒径为10 μm 。将数值计算所得的换热器飞灰沉积率与文献^[25]中的结果进行对比验证, 对比结果如图3所示。全部验证工况中, 数值计算的飞灰沉积率变化趋势与文献结果相同, 且数值相近。综上, 本文采用的飞灰沉积模型与数值方法具有较好的准确性。

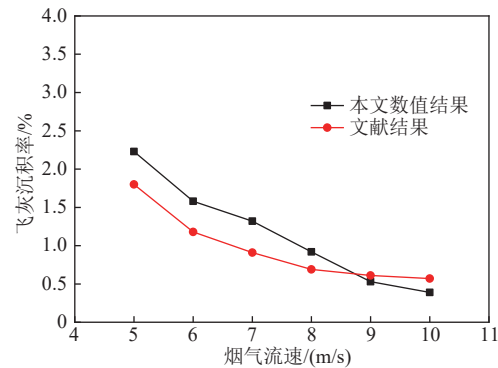


图3 数值计算结果与文献结果的对比验证

Fig. 3 Comparison of numerical calculation results and literature results

2 计算结果与分析

2.1 烟气流速的影响

为研究烟气流速对飞灰沉积特性与流场分布的影响规律, 分别采用1、1.2、1.4、1.6、1.8、2 m/s烟气流速进行SCR外置烟道的数值模拟。根据模拟结果, 获得了不同烟气流速下的飞灰沉积

率,如图4所示。可知,对于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 粒径的飞灰颗粒,其沉积率随着烟气流速的增大而下降。其中,烟气流速 1 m/s 时飞灰沉积率最大,为 24.0% ;烟气流速 2 m/s 时飞灰沉积率最小,为 1.88% 。这说明SCR外置烟道对飞灰颗粒具有一定的捕集能力,能够缓解飞灰对下游脱硝反应器的磨损与堵塞问题。但烟气流速增大,飞灰颗粒的动能也增大,颗粒与壁面碰撞后具有的弹性势能能快速增加,从而超出其黏附能。因此,高烟气流速下,飞灰沉积率大幅降低。

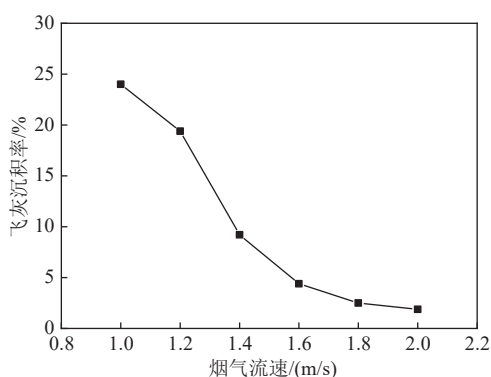


图4 烟气流速对飞灰沉积率的影响

Fig. 4 Effect of flue gas velocity on deposition rate of fly ash

采用速度不均匀系数 C_v 来表征流场分布的均匀程度,其定义^[26]如下:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{V}} \times 100\% \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (V_i - \bar{V})^2}{n-1}} \quad (14)$$

式中: σ 为速度的标准方差; $\bar{V}$ 为所有截面网格点速度的平均值, m/s; V_i 为某一网格点的速度, m/s; n 为截面网格点数量。截面上的 C_v 值越小,表示流场的均匀性越好。

图5为脱硝反应器入口的速度场分布情况。不同烟气流速下,脱硝反应器入口的速度场分布基本相似,故而选取了烟气流速 2 m/s 的工况进行展示。由图5可知,脱硝反应器入口截面外侧烟气流速较高,而内侧烟气流速很低,呈现出内低外高的速度分区现象。原因在于,烟气进入布置有脱硝反应器的下行烟道时,需要经过一个折弯。在惯性作用下,烟气向外侧烟道处聚集,导致烟气流速增大,而内侧烟气流量较小,烟气流速快

速下降。根据图6所示的初始设计脱硝反应器入口中心线速度分布,内侧烟气流速普遍在 2 m/s 以下,而靠近外侧壁面处烟气流速达 9 m/s 以上,差距十分明显。由此可见,脱硝反应器入口流场分布极为不均,其速度不均匀系数高达 93.7% 。如此不均匀的脱硝反应器入口流场分布将加剧飞灰对SCR催化剂的磨损与堵塞。因此,有必要开展SCR外置烟道的流场优化设计工作。

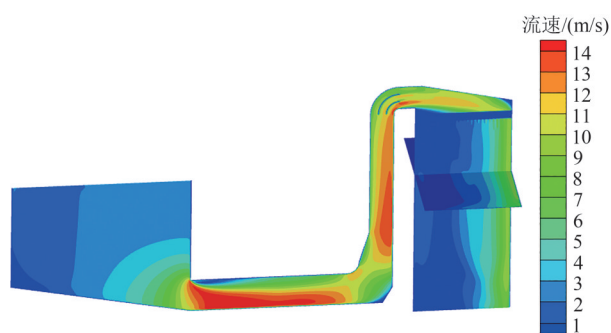


图5 初始设计烟道截面及脱硝反应器入口截面速度云图

Fig. 5 Velocity contours of initial design flue section and inlet section of denitration reactor

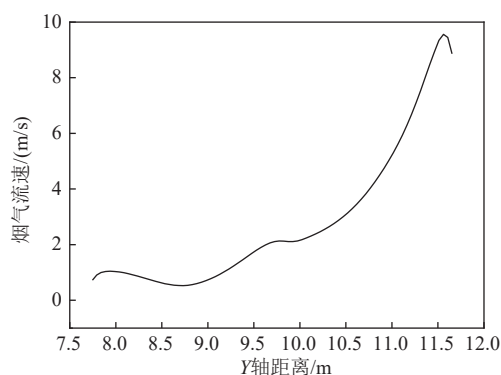


图6 初始设计反应器入口截面中心线速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of reactor section center in initial design

2.2 飞灰粒径的影响

保持烟气流速 1 m/s 不变,分别选取粒径 50 、 100 、 150 、 200 、 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的飞灰进行数值模拟,以此分析飞灰粒径对SCR外置烟道飞灰沉积特性的影响规律。不同飞灰粒径下的飞灰沉积率如图7所示。可以看出,飞灰沉积率随着飞灰粒径的增大而逐步上升。其中,粒径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 时,飞灰沉积率仅为 3.5% 。此时,由于飞灰颗粒粒径较小,飞灰颗粒的动能也相对较小,其跟随烟气流动的能力较强,因此,惯性分离作用效果不明显。

飞灰颗粒粒径增大至 250 μm 时, 颗粒的惯性作用增强, 跟随烟气流动的能力减弱; 同时, 飞灰粒径的增大使得颗粒与表面的黏附能快速增加, 抵抗住了颗粒与壁面碰撞后的弹性势能。所以, 大粒径的飞灰颗粒容易被捕集, 250 μm 的飞灰颗粒沉积率达到 79.5%。显然, SCR 外置烟道能够有效分离大粒径的飞灰颗粒, 起到减轻飞灰颗粒对 SCR 催化剂磨损与堵塞的作用。

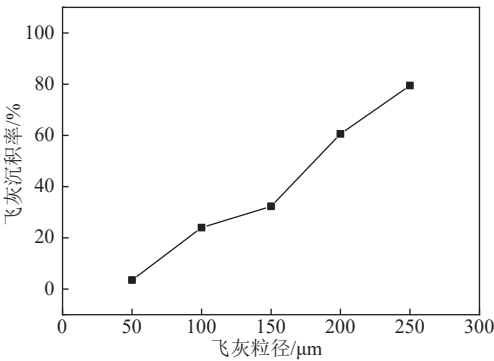


图7 飞灰粒径对飞灰沉积率的影响

Fig. 7 Effect of particle size on fly ash deposition rate

2.3 流场优化

SCR 外置烟道的引入导致 SCR 催化剂入口流场均匀性恶化, 而入口流场的不均会加剧飞灰颗粒对催化剂的磨损。因此, 对烟道折弯导流板进行了优化设计, 以此改善 SCR 催化剂入口流场的均匀性。优化的导流板布置方案如图 8 所示, 烟道折弯的圆弧导流板由 2 块增加至 3 块, 并保持均匀分布。同时, 将圆弧导流板沿着烟道折弯走向

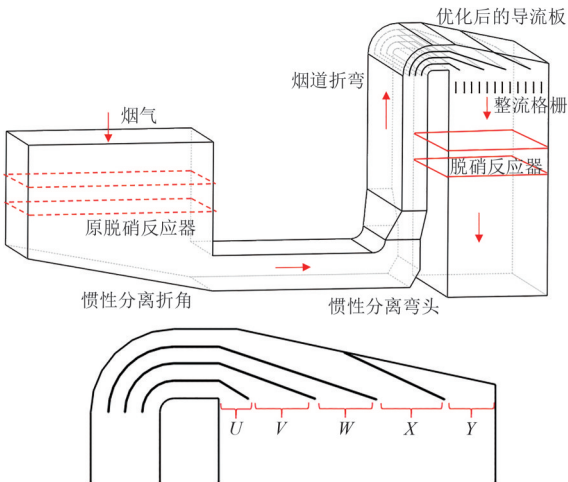


图8 折弯导流板优化布置方案

Fig. 8 Optimal arrangement scheme of bending guide plate

延长至下行烟道入口。为限制最外侧烟气的偏斜, 在折弯斜角增加 1 块斜导流板, 导流板结构尺寸的具体优化方案 1—6 如表 2 所示。

表2 导流板结构尺寸优化方案

Tab. 2 Optimization scheme of guide plate size mm

部位	方案					
	1	2	3	4	5	6
U	800	650	600	550	520	490
V	800	750	900	750	880	910
W	800	900	700	900	950	1 000
X	900	1 050	1 200	1 100	1 000	950
Y	700	650	600	700	650	650

对不同导流板优化方案下的 SCR 外置烟道流场进行了数值模拟。图 9 为方案 1—6 下 SCR 催化剂入口的速度不均匀系数。其中, 方案 1 下 SCR 催化剂入口的速度不均匀系数最高, 为 34.8%。方案 2—4 的速度不均匀系数虽然逐步从 28.6% 下降至 24.2%, 但是其不均匀程度仍较高, 不符合工程上速度不均匀系数小于 15% 的要求。经过分析后, 对方案进行调整得到方案 5—6。在这 2 个方案下, SCR 催化剂入口的速度不均匀系数进一步降低。最终, 方案 6 的 SCR 催化剂入口速度不均匀系数为 14.7%, 满足工程要求。

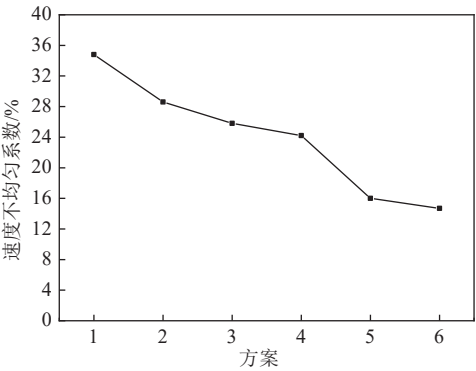


图9 方案1—6下SCR催化剂入口的速度不均匀系数

Fig. 9 Velocity inhomogeneity coefficient of SCR catalyst inlet under case 1-6

最佳导流板优化方案下 SCR 外置烟道的流场情况如图 10 所示。可以看到, 导流板有效烟气限制了烟气的偏斜, 同时, 合理的导流板末端倾斜程度使烟气在下行烟道入口处的分布更加均匀。随后, 烟气经整流格栅流向脱硝反应器。在脱硝反应器入口截面上, 内外侧流速偏差明显减小,

图4中的内低外高速度分区现象基本消除。仅在内侧近壁面处,由于拐角突扩作用,烟气较难到达而导致流速较低。结合图11所示的导流板优化后脱硝反应器入口截面中心线速度分布,烟气流速基本控制在2~3 m/s,呈现出良好的均匀性。依赖于导流板的优化设计,脱硝反应器入口的速度不均匀系数从93.7%下降至14.7%,入口流场均匀性得到显著改善。

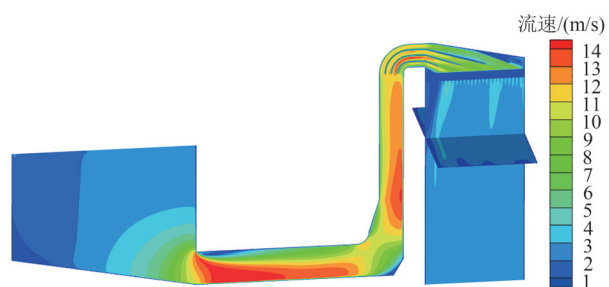


图10 导流板优化后烟道截面与反应器入口截面速度云图
Fig. 10 Velocity contours of flue section and reactor inlet section after guide plate optimization

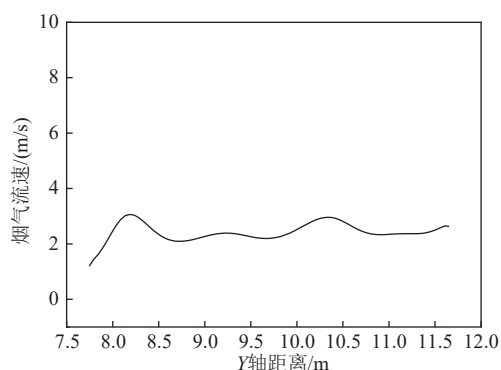


图11 导流板优化后反应器入口截面中心线速度分布
Fig. 11 Velocity distribution of reactor section center after guide plate optimization

3 结论

通过数值模拟,开展了SCR外置烟道的飞灰沉积特性与流场优化研究,总结归纳了飞灰颗粒粒径与烟气流速对飞灰沉积率的影响规律。在流场分析的基础上,提出脱硝反应器入口流场优化方案,改善流场均匀性。主要结论如下:

1) 飞灰沉积率随着烟气流速的增大而快速降低。烟气流速从1 m/s上升至2 m/s时,飞灰沉积率由24.0%下降至1.88%。

2) 随着飞灰颗粒粒径的增大,飞灰沉积率快

速上升,这表明SCR外置烟道具有捕集烟气中飞灰的能力,但难以捕集50 μm 以下的飞灰颗粒。

3) 脱硝反应器入口流速分布极为不均,其速度不均匀系数高达93.7%;通过导流板布置优化后,入口流场均匀性得到改善,速度不均匀系数下降至14.7%。

参考文献

- [1] 张全斌,周琼芳. 基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 143-154.
ZHANG Q B, ZHOU Q F. Research on the development path of China's thermal power generation technology based on the goal of "carbon peak and carbon neutralization" [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 143-154.
- [2] 冯伟忠,李励. “双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 452-461.
FENG W Z, LI L. Research and practice on development path of low-carbon, zero-carbon and negative carbon transformation of coal-fired power units under "double carbon" targets[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 452-461.
- [3] 赵大周,郑文广,何胜. 660 MW机组SCR系统喷氨格栅堵塞的原因分析及优化[J]. 电站系统工程, 2016, 32(2): 77-79.
ZHAO D Z, ZHENG W G, HE S. Analysis and optimization of cause of ammonia injection grid blockage in 660 MW power unit SCR system[J]. Power System Engineering, 2016, 32(2): 77-79.
- [4] 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: 216-218.
SUN K Q, ZHONG Q. Flue gas denitrification technology and engineering application in thermal power plants[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 216-218.
- [5] 李春雨. 我国火电厂SCR烟气脱硝技术研究及应用现状分析[C]//第十五届中国科协年会. 贵阳: 中国科学技术协会, 2013: 1-4.
LI C Y. Research and application status analysis of SCR flue gas denitrification technology in thermal power plants in my country[C]//The 15th Annual Conference of the China Association for Science and Technology. Guiyang: China Association for Science and Technology, 2013: 1-4.

- [6] 张强, 张西涛. 燃煤电站实施SCR脱硝技术的关键工艺选择[J]. 热力发电, 2007, 36(4): 1-4.
ZHANG Q, ZHANG X T. Choise of key technology for implementing SCR denitrification technique in coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(4): 1-4.
- [7] 徐克涛, 何永兵, 裴煜坤, 等. 某燃煤电厂SCR脱硝装置堵塞问题分析及改进[J]. 华电技术, 2019, 41(6): 46-49.
XU K T, HE Y B, PEI Y K, et al. Analysis and improvement of SCR denitrification devices blockage in a coal-fired power plant[J]. Huadian Technology, 2019, 41(6): 46-49.
- [8] 姜烨, 高翔, 吴卫红, 等. 选择性催化还原脱硝催化剂失活研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(14): 18-31.
JIANG Y, GAO X, WU W H, et al. review of the deactivation of selective catalytic reduction DeNO_x catalysts[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(14): 18-31.
- [9] 孙叶柱, 王义兵, 梁学东, 等. 火电厂SCR烟气脱硝反应器前设置灰斗及增加烟道截面的探讨[J]. 电力建设, 2011, 32(12): 64-68.
SUN Y Z, WANG Y B, LIANG X D, et al. Discussion on installation of ash hopper and enlargement of flue section before SCR for coal-fired power plant[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(12): 64-68.
- [10] 陈鸿伟, 罗敏, 王远鑫, 等. 燃煤锅炉飞灰对SCR脱硝催化剂的影响及预防措施[J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(3): 200-211.
CHEN H W, LUO M, WANG Y X, et al. Influence of coal-fired boiler fly ash on SCR denitration catalysts and preventive measures[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017, 23(3): 200-211.
- [11] 文小于, 陶莉, 周艳明. 飞灰对SCR脱硝系统的影响[J]. 湖南电力, 2014(6): 51-54.
WEN X Y, TAO L, ZHOU Y M. Influence of fly ash on selective catalytic reduction denitration system[J]. Hunan Electric Power, 2014(6): 51-54.
- [12] 汪洋, 胡永锋. 燃煤电站SCR脱硝系统预防大颗粒灰堵塞方法[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(2): 17-19.
WANG Y, HU Y F. Methods to mitigate effects of large particle ash on selective catalytic reduction systems of coal-fired power plant[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2012, 28(2): 17-19.
- [13] 单小云. 循环流化床生物质锅炉脱硝系统优化的分析与实践[J]. 中国高新科技, 2020(9): 123-124.
- SHAN X Y. Analysis and practice of denitration system optimization in circulating fluidized bed boiler of biomass[J]. China High and New Technology, 2020(9): 123-124.
- [14] 贾双燕, 路涛, 李晓芸. 选择性催化还原烟气脱硝技术及其在我国的应用研究[J]. 电力科技与环保, 2004, 20(1): 19-21.
JIA S Y, LU T, LI X Y. SCR denitrification technology and its application in our country[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2004, 20(1): 19-21.
- [15] 周强泰, 周克毅, 冷伟, 等. 锅炉原理[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2014: 333-335.
ZHOU Q T, ZHOU K Y, LEI W, et al. Boiler principle[M]. 3 Ed. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 333-335.
- [16] 廖永进, 陆继东, 黄秋雄, 等. 选择性催化还原服役后催化剂活性及动力学实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(17): 37-44.
LIAO Y J, LU J D, HUANG Q X, et al. Experimental study on activity and kinetics of served SCR catalysts[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(17): 37-44.
- [17] 姜烨, 高翔, 杜学森, 等. 钾盐对V₂O₅/TiO₂催化剂上NH₃选择性催化还原NO反应的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(35): 21-26.
JIANG Y, GAO X, DU X S, et al. Effects of potassium salts on selective catalytic reduction of NO with NH₃ over V₂O₅/TiO₂ catalysts[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(35): 21-26.
- [18] MORSI S, ALEXANDER A. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55: 193-208.
- [19] 文夏楠, 王随林, 翟慧星, 等. 含尘烟气在波纹板换热面上流动积灰换热数值模拟研究[J]. 锅炉技术, 2020, 51(3): 13-19.
WEN X N, WANG S L, ZHAI H X, et al. Numerical simulation on heat transfer performance when dusty flue gas flows through surface of corrugated plate [J]. Boiler Technology, 2020, 51(3): 13-19.
- [20] BEEK M. Gas-side fouling in heat-recovery boiler[M]. Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2001: 183-185.
- [21] TONG Z, LI M, HE Y, et al. Simulation of real time particle deposition and removal processes on tubes by coupled numerical method[J]. Applied Energy, 2017, 185: 2181-2193.
- [22] ROGERS L, REED J. The adhesion of particles

- undergoing an elastic-plastic impact with a surface[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1984, 17: 677-689.
- [23] PAN Y, SI F, XU Z, et al. An integrated theoretical fouling model for convective heating surfaces in coal-fired boilers[J]. Powder Technology, 2011, 210: 150-156.
- [24] THORNTON C, NING Z. A theoretical model for the stick/bounce behaviour of adhesive, elastic-plastic spheres[J]. Powder Technology, 1998, 99: 154-162.
- [25] HAN H, HE Y, TAO W, et al. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72: 210-221.
- [26] 冉景煜, 邓庆波, 牛俊天, 等. 湿法脱硫塔内流场均匀性影响因素及其评价方法[J]. 动力工程学报, 2020, 40(10): 825-831.
- RAN J Y, DENG Q B, NIU J T, et al. Influence factors and evaluation method on the uniformity of flow field in a WFGD tower[J]. Journal of Chinese Society

of Power Engineering, 2020, 40(10): 825-831.

收稿日期: 2023-06-13。

修回日期: 2023-08-24。

作者简介:



李凯

李凯(1991), 男, 博士, 工程师, 研究方向为烟气深度净化技术, lksjtu@qq.com;



李廉明

李廉明(1986), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为生物质热电联产、废弃物处理等, 本文通信作者, lilianming@zjmi.com。

(责任编辑 辛培裕)