

CFB 锅炉分离器脱硝特性数值模拟研究

王 兴^{1,2}, 乔 杰³, 王 东², 王 磊², 张志强², 林正根²

(1. 怀柔实验室山西研究院, 山西 太原 030032; 2. 低碳智能燃煤发电与超净排放全国重点实验室(国家能源集团科学技术研究院有限公司), 江苏 南京 210023; 3. 山西大学电力与建筑学院, 山西 太原 030000)

摘要: 为了揭示循环流化床锅炉旋风分离器的脱硝特性, 本文采用数值计算的方法, 以某 300 MW 循环流化床锅炉为研究对象, 主要研究了尿素溶液喷枪安装数量及布置方式、尿素溶液雾化粒径、氨氮摩尔比以及锅炉负荷对 SNCR 脱硝效果的影响。结果表明, 尿素喷枪数量及布置方式对氨氮在垂直方向的均匀混合有重要影响, 喷枪数量为 14 支且采用双侧错层均匀布置时性能最佳; 尿素溶液的粒径主要影响氨氮在水平方向的均匀混合程度, 粒径为 80 μm 时混合效果最好; 氨氮摩尔比存在一个最佳范围, 偏大或偏小都会带来不利影响, 满负荷工况下的最佳氨氮摩尔比为 1.2; 脱硝效率随着负荷的减少而降低, 在 40% 负荷以下时, 由于烟气温度偏低, 单独采用分离器 SNCR 脱硝方式无法满足超低排放需求。本文的研究结论对 CFB 锅炉的分离器脱硝系统设计及运行有一定的借鉴意义。

关键词: 循环流化床; SNCR; 数值模拟; 分离器脱硝; 氨氮摩尔比

中图分类号: TK01

文章编号: 1674 - 8069(2024)06 - 0615 - 10

文献标志码: A

DOI 编号: 10.19944/j.eptep.1674 - 8069.2024.06.006

[引用本文格式] 王兴, 乔杰, 王东, 等. CFB 锅炉分离器脱硝特性数值模拟研究[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(6): 615-624.

WANG Xing, QIAO Jie, WANG Dong, et al. Numerical simulation study on denitrification characteristics of CFB boiler separator[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(6): 615-624.

Numerical simulation study on denitrification characteristics of CFB boiler separator

WANG Xing^{1,2}, QIAO Jie³, WANG Dong², WANG Lei², ZHANG Zhiqiang², LIN Zhenggen²

(1. ShanXi Research Institute of Huairou Laboratory, Taiyuan 030032, Shanxi China; 2. State Key Laboratory of Low-carbon Smart Coal-fired Power Generation and Ultra-clean Emission, China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210023, Jiangsu China; 3. School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030000, Shanxi China)

Abstract: To investigate the denitrification characteristics of a cyclone separator in a circulating fluidized bed boiler, a 300 MW circulating fluidized bed boiler is chosen as the subject of this study. The impact of various key parameters on denitration efficiency, including the number and arrangement of urea spray devices, urea particle size, NH_3/NO mole ratios, and boiler load. The numerical results suggested that the quantity and arrangement of urea spray devices significantly influence the mixing uniformity of ammonia nitrogen vertically. The best performance was achieved when there are 14 spray guns evenly distributed on both sides. Meanwhile, the particle size of the urea solution primarily affected the mixing horizontally, with the best mixing effect observed at a particle size of 80 μm . There existed an optimal range for NH_3/NO mole ratios, beyond which denitration efficiency decreases. The optimal nitrogen molar ratio under full load operating conditions was 1.2. Denitrification efficiency decreases continuously as the boiler load decreased. This led to a situation where, when the boiler load fell below 40%, removing NO_x solely in the cyclone separator was insufficient to meet the requirement of ultra-low emissions due to low flue gas temperatures in the cyclone separator. The findings of this study provided valuable insights for the design and operation of the denitration system of CFB boiler separators.

Key words: circulating fluidized bed; SNCR; numerical simulation; separator denitrification; NH_3/NO mole ratios

收稿日期: 2024-07-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3701504)

0 引言

基于我国能源分布的基本国情,燃煤发电在我国电力供应中仍处于重要地位。在现有燃煤技术中,循环流化床(circulating fluid bed, CFB)锅炉由于具有燃烧效率高、污染物排放少、负荷调节范围广以及稳燃性能好等优点,在我国得到了快速发展^[1-7]。在低氮燃烧和烟气脱硝方面,CFB锅炉额定负荷运行时,炉膛及分离器的温度可保持在850~950℃的范围内,该温度区间不仅可以大量减少燃烧过程中 NO_x 的生成量,而且满足了尿素溶液快速热解和高效地发生还原反应对温度的要求,因此SNCR技术在CFB锅炉得到了大量的应用^[8-13]。但是SNCR技术的实际脱硝效果受到了诸多因素的影响,比如温度、 NH_3 在烟气中分布的均匀性、氨-氮摩尔比,以及控制方式等。因此,开展喷氨优化和精准喷氨方面的研究具有非常重要的意义^[14-21]。

目前,针对CFB锅炉分离器内的烟气脱硝研究主要集中在控制方面,而从物理角度进行的研究较少。因此,本文从尿素溶液的颗粒直径、喷枪布置方式、烟气温度(对应锅炉负荷)等方面研究了各因素对分离器内脱硝效果的影响,相关的研究结论对CFB锅炉的分离器脱硝系统设计及运行有一定的借鉴意义。

1 实验方法

1.1 研究对象

某电厂建设有300 MW亚临界循环流化床锅炉,在运行过程中出现了 NO_x 排放浓度高和氨逃逸浓度大的问题。尤其是低负荷运行时,这个问题更加严重。该厂的脱硝系统共设计有4支尿素溶液喷枪,分为上下2层,垂直布置在旋风分离器的入口烟道处,如图1所示。

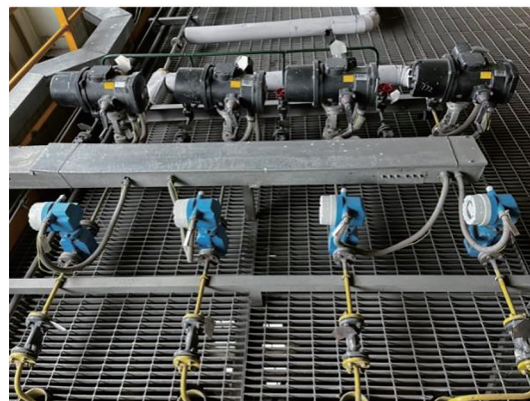
尿素溶液系统包括稀释水罐、尿素储存罐、压缩空气罐、流量调节阀、混合器、逆止阀和喷枪组成,如图2所示。

基于两相流基本理论、CFB锅炉运行原理及SNCR技术原理^[22-28]可以发现,影响CFB锅炉的分离器SNCR脱硝效率的因素通常有:

①喷枪安装位置不合理导致的尿素与烟气混合不均匀;②喷枪雾化颗粒不合理,导致尿素在烟道内的穿透深度不合理,进而使得尿素与烟气混合



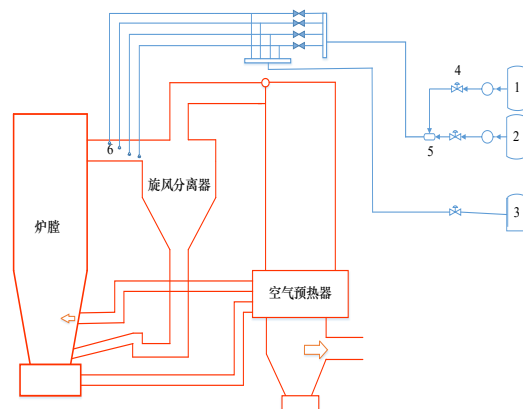
(a) 装在分离器入口的尿素喷枪



(b) 尿素流量计和调节阀门

图1 尿素喷枪及就地设备

Fig.1 Urea spray gun and local equipment



注:1—稀释水罐,2—尿素储存罐,3—压缩空气罐,4—流量调节阀,5—混合器,6—喷枪。

图2 SNCR脱硝系统图

Fig.2 SNCR denitration system diagram

不均匀;③氨氮摩尔比不合理,导致 NO_x 浓度不达标或氨逃逸过大;④低负荷烟温降低,偏离了尿素最佳工作范围,导致脱硝效果更差。

针对以上影响因素,结合该厂脱硝系统存在的问题,本文采用数值模拟的研究方法,对 CFB 锅炉的分离器脱硝过程进行了较为全面的详细研究,主要研究内容包括:喷枪安装数量及布置方式对氨氮混合的影响;尿素溶液雾化粒径对氨氮混合的影响;氨氮摩尔比对脱硝的影响;锅炉负荷对脱硝的影响。

1.2 数值计算

1.2.1 旋风分离器几何模型

该厂 300 MW 机组的 CFB 锅炉配有 3 台冷却式旋风分离器,旋风分离器上半部分为圆柱形,下半部分为锥形。上、下各为 1 个环形集箱,两集箱之间通过管子连接,蒸汽流程从下往上。烟气出口为圆筒形钢板件,形成一个端部敞开的圆柱体。细颗粒和烟气先旋转下流至圆柱体的底部,而后向上流动离开旋风分离器。粗颗粒落入直接与旋风分离器相连接的“U”阀回料器立管。旋风分离器为膜式包墙过热器结构,其顶部与底部均与环形集箱相连,墙壁管子在顶部向内弯曲,使得在旋风分离器管子和烟气出口圆筒之间形成密封结构。旋风分离器内表面敷设防磨材料。旋风分离器中心筒由高温高强度、抗腐蚀、耐磨损的奥氏体不锈钢 SA-240S30815 钢板卷制而成。旋风分离器的主要结构尺寸如表 1 所示。

表 1 旋风分离器主要结构尺寸

Tab.1 Main structure dimensions of cyclone separator

单位:mm

项目	数值
旋风分离器直径	8 595
旋风分离器进口高度	8 500
旋风分离器进口宽度	2 500
旋风分离器中心筒直径	4 049
旋风分离器中心筒插入深度	2 447

根据表 1 的旋风分离器尺寸,建立了旋风分离器几何模型,如图 3 所示。

1.2.2 分离器网格

采用六面体网格法对模型进行网格划分,入口和出口等处进行局部加密,初次划分的网格数量为 9.8×10^5 ,然后通过改变全局网格尺寸因子逐步增加网格数量,并对不同网格数量的模型进行 FLUENT 模拟计算,当相邻两次解的偏差小于 5% 时,认为满足了网格无关性检验,建立网格数量分

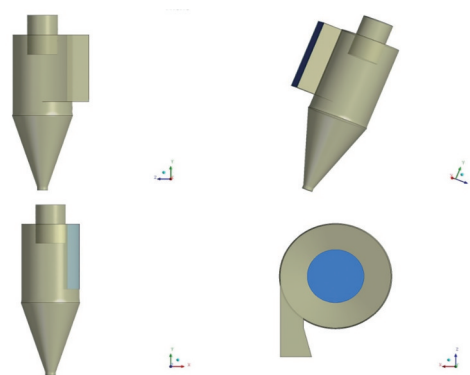


图 3 旋风分离器几何模型

Fig.3 Geometric model of cyclone separator

别为 9.8×10^5 、 1.12×10^6 、 1.34×10^6 、 1.51×10^6 。对这 4 种网格的初步模拟结果,在网格数量为 1.34×10^6 时,网格尺寸扭曲率为 0.37,优于其余网格的扭曲尺寸(0.46、0.43、0.39)。此时最终确定的网格总数为 1.34×10^6 ,网格的尺寸扭曲率不超过 0.5。最终划分的分离器网格如图 4 所示。



图 4 旋风分离器网格划分示意图

Fig.4 The grid division diagram of cyclone separator

1.2.3 数学模型

SNCR 脱硝过程中的气相流动采用欧拉-拉格朗日方法,假设烟气组分为 N_2 、 H_2O 、 O_2 、 CO_2 和 NO 以及还原剂蒸发、分解产物组成的理想混合气体,其质量、动量、能量和组分质量的守恒(或平衡)方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \rho F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x_j^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad}(T) \right) + S_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} Y_k) = \text{div}(D_k \text{grad}(\rho Y_k)) + S_k \quad (4)$$

通常用于多相流计算的模型有流体体积法(volume of fluid, VOF)模型、混合物模型和欧拉模型。本文采用VOF模型,该模型对于流体的连续性方程为

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \bar{u}_q) \right] = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (5)$$

分离器内的湍流流动特性采用RMS模型进行计算,选择P1模型计算旋风分离器内的辐射特性,壁面设置为绝热壁面。喷入的尿素为液滴,符合Rosin-Rammler分布,使用离散相DPM模型描述。模拟计算中的压力速度耦合采用SIMPLEC压力-速

度耦合算法,空间离散化压力项采用PRESTO压力插补格式,动量方程、湍动能和湍动耗散率均采用二阶迎风格式。设置液滴类型为combusting,材料为urea-solid,蒸发物质尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)。

复杂机理虽然可以对SNCR反应进行深入的分析 and 比较准确的预测,但计算收敛性较差,耗费的计算资源较多。研究表明,采取简化机理的SNCR脱硝模拟精度完全能够满足工程应用的需要。因此本文采用文献[29]提出的7步反应模型,涉及14个组分,9个基本化学反应,如表2所示。表2中参数为本文采用的脱硝化学反应的动力学参数,其中反应1和2是尿素分解反应模型,反应3—9是SNCR反应模型。

表2 SNCR反应模型
Tab.2 SNCR reaction model

序号	反应方程	指前因子 $A/(s^{-1} \cdot K^{-b})$	温度指数 b	活化能 $E_a/(J \cdot kmol^{-1})$
1	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HNCO}$	1.27×10^4	0	6.50×10^7
2	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$	6.13×10^{10}	0	8.87×10^7
3	$\text{NH}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	4.24×10^5	5.30	3.50×10^8
4	$\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	3.50×10^2	7.65	5.24×10^8
5	$\text{HNCO} \rightarrow \text{H} + \text{NCO}$	2.40×10^{14}	0.85	2.85×10^8
6	$\text{NCO} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{CO}$	1.00×10^{10}	0	-1.36×10^6
7	$\text{NCO} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{CO} + \text{H}$	1.00×10^{13}	0	0
8	$\text{N}_2\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{H}$	2.00×10^{12}	0	4.19×10^7
9	$\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$	1.60×10^{14}	0	2.16×10^8

设置脱硝效率表征SNCR反应的效果,脱硝效率 η_{NO} 的计算公式为

$$\eta_{\text{NO}} = \frac{\phi_{\text{NO},\text{in}} - \phi_{\text{NO},\text{out}}}{\phi_{\text{NO},\text{in}}} \times 100\% \quad (6)$$

2 结果与讨论

2.1 模拟结果可靠性分析

为了验证模拟结果的可靠性,在DCS系统中调取了机组在实际运行工况下的运行数据。对比验证了不同负荷工况的模拟结果与现场DCS数据进行,对比了不同旋风分离器入口烟温,对比结果如表3所示。由表3可知,模拟结果与实际运行参数之间的误差在5%之内,因此本文采用的数学模型和模拟方法是可靠的。

表3 模拟结果与实际运行数据对比

Tab.3 The simulation results compared with the actual operation data

负荷/MW	入口烟温/ $^{\circ}\text{C}$		偏差/%
	模拟结果	实际结果	
300	789.13	767.94	2.71
210	701.18	683.55	2.51
120	641.43	624.47	2.64

2.2 喷枪安装数量及布置方式对氨氮混合的影响

尿素溶液与烟气的均匀混合对旋风分离器内的SNCR脱硝系统的脱硝效率有决定性的影响,而二者之间的均匀混合主要体现在2个方面:一是沿分离器入口烟道垂直方向的混合,二是沿分离器入口烟道水平方向的混合。垂直方向的混合均匀

性主要取决于尿素溶液的喷入方式,因此本文研究了不同的喷枪数量和喷枪布置方式对尿素溶液分布的影响,共设计了 6 种工况,如表 4 所示。

本文对上述 6 个不同工况分别进行了数值模拟研究,模拟结果表明,随着喷枪数量的增加,分离器入口截面的尿素溶液分布趋向均匀,并且双侧错层均匀布置的效果要优于双侧等高布置。当喷枪数量增加到 14 支且采用双侧错层均匀布置时(即工况 6),尿素溶液在分离器的入口截面的中心区域(垂直方向)达到了连续分布,如图 5 所示。

由图 5 可知还原剂轨迹几乎完全覆盖水平烟道竖直方向,表明氨氮沿垂直方向基本达到了均匀分布。因此,从上述模拟研究中总结出的最佳尿素溶

表 4 喷枪数量以及布置方式的模拟工况

Tab.4 Simulation operating conditions of the number and arrangement of spray guns

工况	负荷/ MW	烟气温 度/ $^{\circ}\text{C}$	初始 NO_x 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	喷枪 数量/支	喷枪布置形式
1	300	920	150	10	双侧等高布置
2	300	920	150	10	双侧错层均匀布置
3	300	920	150	12	双侧等高布置
4	300	920	150	12	双侧错层均匀布置
5	300	920	150	14	双侧等高布置
6	300	920	150	14	双侧错层均匀布置

液喷枪的设计数量和喷枪布置方式为“沿分离器入口烟道的垂直方向,双侧错层均匀布置 14 支喷嘴”。

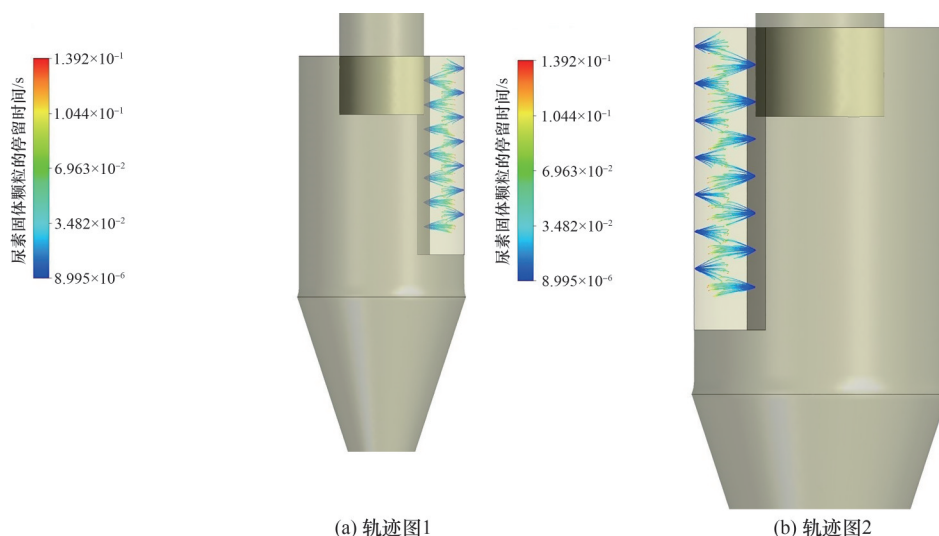


图 5 工况 6 下的还原剂轨迹分布图

Fig.5 The trajectory distribution of reducing agent under operating condition 6

2.3 尿素溶液雾化粒径对氨氮混合的影响

尿素液滴的直径主要影响其进入到分离器入口烟道后的穿透深度,从而影响其在水平方向的分布均匀性。本文主要研究了 5 种不同雾化粒径下的水平轨迹分布,5 种模拟工况如表 5 所示。

本文对上述 5 个工况分别进行了数值模拟研究。模拟结果表明,随着尿素液滴直径的增加,其惯性也同步增大,因此尿素溶液在分离器入口横截面的穿透深度逐渐增加,当平均直径增大到 $80\ \mu\text{m}$ (即工况 10)时,从两侧喷放的尿素液滴在烟道中心区域取得了良好的分布效果,如图 6 所示。

从图 6 可以发现,当尿素溶液的液滴直径较小

表 5 不同颗粒模拟工况

Tab.5 Different particle simulation conditions

工况	负荷/MW	烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	喷枪数量/支	平均雾化粒径/ μm
7	300	920	14	20
8	300	920	14	40
9	300	920	14	60
10	300	920	14	80
11	300	920	14	100

时,尿素溶液进入到烟道后,由于液滴惯性较小,因此在烟气流场的作用下,迅速改变流动方向,并快速完成热解汽化,所以从烟道两侧喷入的尿素溶液无法在烟道中心区域汇合,导致烟道中心区

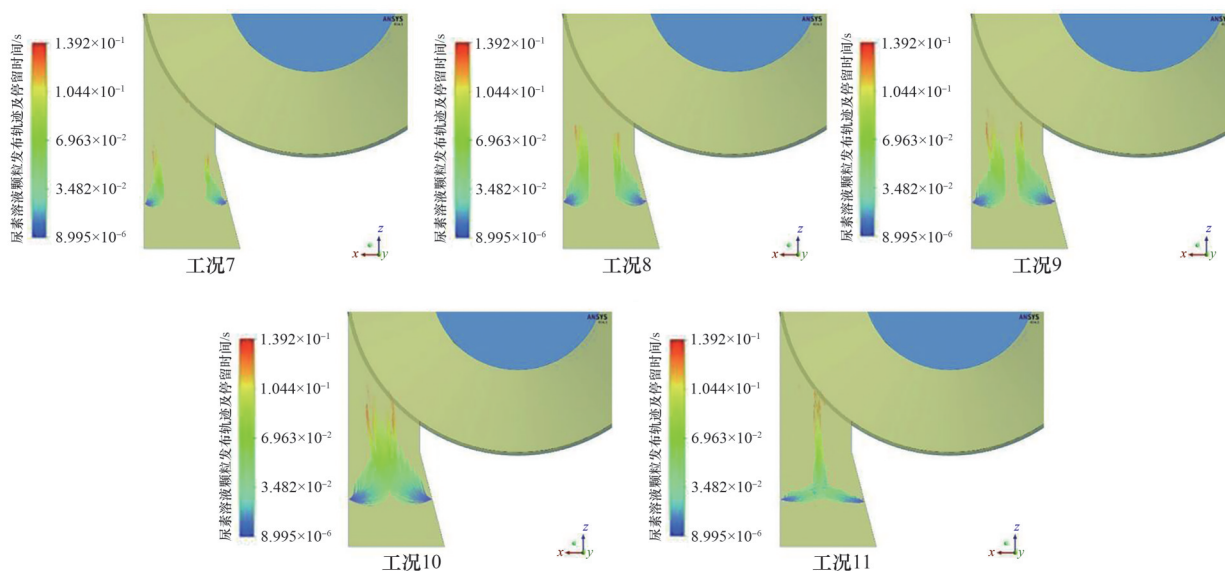


图6 工况10的还原剂轨迹分布图

Fig.6 The trajectory distribution of reducing agent under operating condition 10

域没有尿素溶液,出现尿素溶液分布不均匀问题。当尿素溶液增大到 $80\text{ }\mu\text{m}$ 时,液滴的惯性明显加大,尿素溶液在烟道中心区域成功汇合,所以热解生成的还原剂 NH_3 布满了整个烟道横截面,能够取得良好的混合效果。但当颗粒直径继续增大时,到达烟道中心区域的尿素溶液较多,而靠近烟道壁面区域的尿素较少,也会导致尿素溶液分布不均匀,所以综合考虑,工况10取得了最佳的还原剂均匀分布效果。

因此,通过本部分的模拟研究,总结出的最佳尿素溶液雾化粒径为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 。

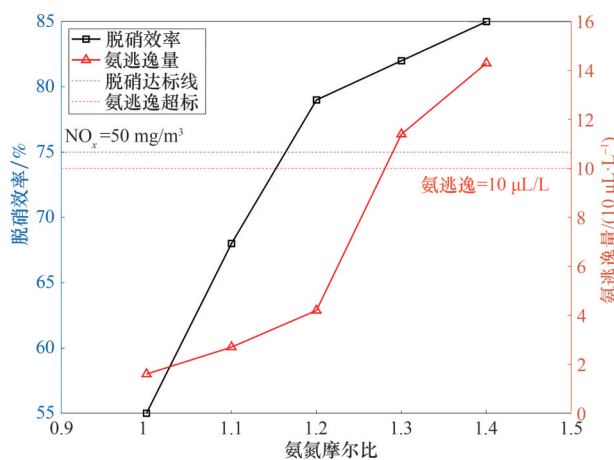
2.4 氨氮摩尔比对脱硝效率的影响

在完成喷枪布置及最佳尿素液滴直径研究后,进行了氨氮摩尔比(以下简称 R)优化研究,提高 R 即增加尿素的喷入量,在相同反应温度和停留时间条件下,能够提高旋风分离器中反应物还原剂的质量浓度,加快还原 NO 的反应速度,但过大的 R 会造成更多的氨逃逸,因此存在最佳的 R 值。为了确定本文模拟条件下的最佳 R 值,共模拟了5种工况,如表6所示。

本文对上述5个工况分别进行了数值模拟研究。模拟结果表明,随着 R 的逐步增大,脱硝效率明显增加,同时氨逃逸浓度也在上升,如图7所示。由图7可知,当 $R < 1.2$ 时,随着 R 的增大,脱硝效率出现了明显的快速增加,例如 R 从1.0增大到

表6 最佳 R 模拟工况Tab.6 Best R simulation operating conditions

工况	负荷/ MW	烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	初始 NO_x 浓 度/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	喷枪 数量/支	雾化颗粒/ μm	R
12	300	920	150	14	80	1.0
13	300	920	150	14	80	1.1
14	300	920	150	14	80	1.2
15	300	920	150	14	80	1.3
16	300	920	150	14	80	1.4

图7 R 对 SNCR 性能的影响Fig.7 Effect of R on SNCR performance

1.2时,脱硝效率从55%增大到了79%。但当 $R > 1.2$ 时,随着 R 的进一步增大,脱硝效率的增长速度

明显减慢,例如 R 从 1.2 增大到 1.4 时,脱硝效率从 79% 增大到了 85%,只增加了 6%。同时,当 $R < 1.2$ 时,随着 R 的增大,氨逃逸量增加的较慢,例如 R 从 1.0 增大到 1.2 时,氨逃逸量从 $1.8 \mu\text{L/L}$ 增大到了 $4.0 \mu\text{L/L}$,只增加了 $2.2 \mu\text{L/L}$;但当 $R > 1.2$ 时,随着 R 的进一步增大,氨逃逸量的增长速度明显加快,

例如 R 从 1.2 增大到 1.4 时,氨逃逸量从 $4.0 \mu\text{L/L}$ 增大到了 $14.0 \mu\text{L/L}$,增幅达到了 $10 \mu\text{L/L}$ 。同时,当 $R = 1.2$ 时, NO_x 的排放浓度低于国家排放允许值 50 mg/m^3 ,氨逃逸浓度低于 $6 \mu\text{L/L}$ 的评价指标,因此可以确定工况 14 的 $R = 1.2$ 为最佳工况,如图 8 所示。

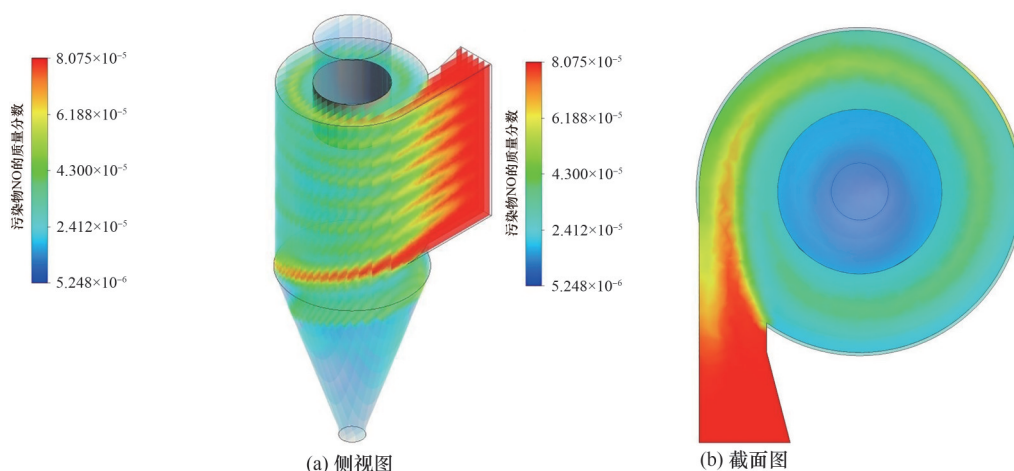


图 8 旋风分离器 NO_x 质量浓度分布图

Fig.8 NO_x mass concentration distribution diagram of cyclone separator

2.5 锅炉负荷对脱硝效率的影响

当锅炉负荷变化时,炉膛出口烟温有着明显的改变,且烟气中 NO_x 的含量也同步发生变化。而烟气温度对尿素的热解速率,以及氨气与 NO_x 之间的反应速率有着非常重要的影响,因此研究不同负荷下分离器内的脱硝过程及脱硝效率有着重要的意义。为考察不同负荷下 SNCR 性能的表现,进行了 100%、70% 和 40% 3 种不同负荷下的模拟,模拟工况如表 7 所示。

表 7 锅炉负荷模拟工况

Tab.7 Boiler load simulation conditions

工况	负荷/ MW	烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	初始 NO_x 浓 度/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	喷枪 数量/支	雾化颗粒/ μm	R
17	300	920	150	14	80	1.2
18	210	800	200	14	80	1.2
19	120	640	270	14	80	1.2

本文对上述 3 个工况分别进行了数值模拟研究,重点分析了不同锅炉负荷工况下, NO_x 排放浓度和氨逃逸浓度的变化情况。模拟结果如图 9、图 10

所示。由图 9、图 10 可知,锅炉负荷对旋风分离器出口的 NO_x 与 NH_3 质量分数有着重要影响。模拟研究表明,随着锅炉负荷的降低,分离器内的脱硝效率明显降低,同时氨逃逸浓度明显上升。这是因为随着锅炉负荷的降低,烟气温度也明显下降,而尿素溶液的快速热解和还原反应均要求烟温在 800°C 以上。当锅炉负荷较低时,分离器内的烟气温度已经无法满足 SNCR 技术对烟温窗口的要求,所以,随着锅炉负荷的下降,SNCR 技术的脱硝效率明显下降。

为了量化分析锅炉负荷对脱硝性能的影响,本文对不同负荷下 NO_x 的排放浓度和氨逃逸浓度进行了比较,结果如图 11 所示。由图 11 可知,当锅炉负荷为 100% 时,分离器脱硝处于正常工作状态, NO_x 排放浓度及氨逃逸浓度均满足要求;当锅炉负荷下降到 70% 时,脱硝效率有所降低,但 NO_x 排放浓度和氨逃逸浓度尚在允许范围内;当锅炉负荷降低到 40% 时, NO_x 排放浓度和氨逃逸浓度均超出了允许值。因此,40% 工况下单独采用分离器 SNCR 脱硝方式无法满足超低排放需求。

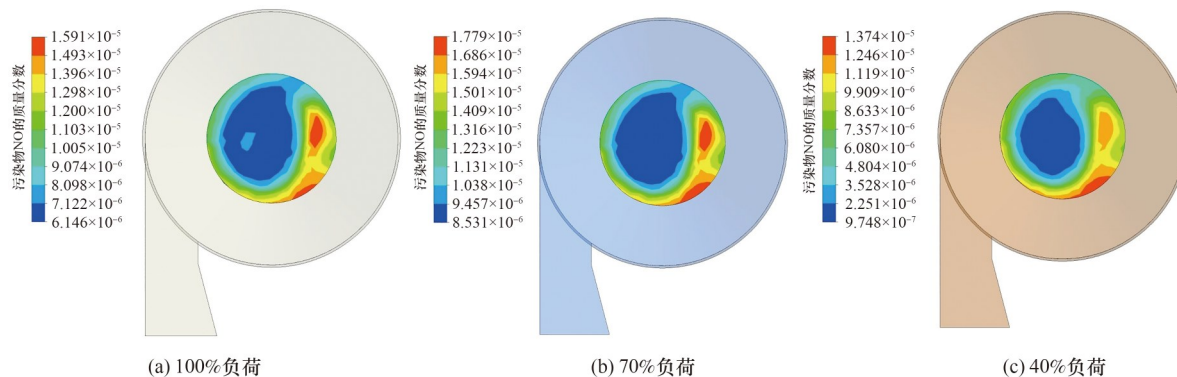
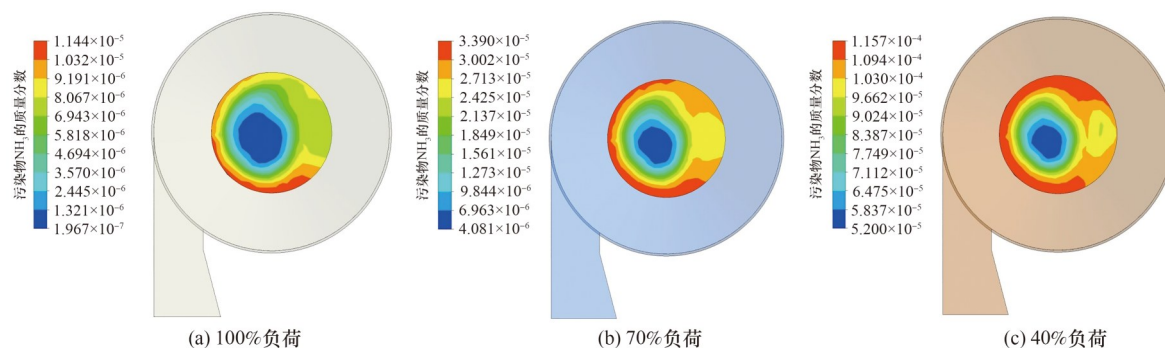
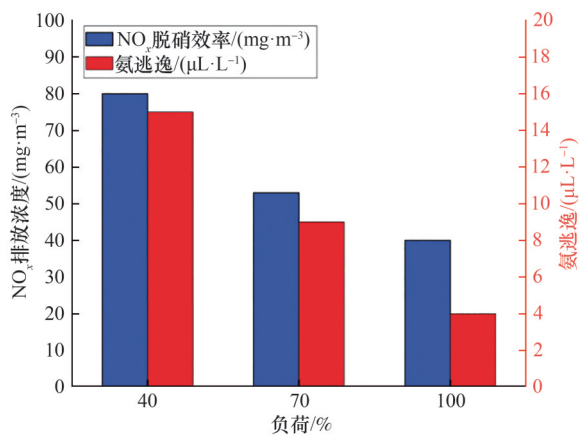
图9 不同负荷分离器出口 NO_x 质量分数分布Fig.9 Distribution of NO_x mass fraction at the outlet of separator with different loads图10 不同负荷分离器出口 NH_3 逃逸质量分数分布Fig.10 Distribution of NH_3 escape mass fraction at the outlet of separator with different loads

图11 不同负荷SNCR性能对比

Fig.11 Comparison of SNCR performance under different loads

3 结论

本文采用数值计算的方法,共模拟了19个工况,详细研究了喷枪安装数量及布置方式对氨氮混

合的影响、尿素溶液雾化粒径对氨氮混合的影响、氨氮摩尔比对脱硝的影响以及锅炉负荷对脱硝的影响。

1)喷枪数量为14支且采用双侧错层均匀布置时,尿素溶液的运动轨迹充满了入口烟道的垂直截面,实现了还原剂与烟气在垂直方向上的均匀混合。

2)尿素溶液的粒径为80 μm时,尿素溶液的运动轨迹充满了入口烟道的横截面,实现了还原剂与烟气在水平方向上的均匀混合。

3)脱硝效率随氨氮摩尔比增大逐渐增大,同时氨逃逸量增加,综合考虑SNCR脱硝效率以及氨逃逸,满负荷工况下的最佳氨氮摩尔为1.2。

4)SNCR脱硝系统在100%负荷下工作正常,在70%负荷勉强满足排放要求,但在40%负荷下, NO_x 排放及氨逃逸均存在超标现象。

参考文献:

[1] 吕俊复,蒋苓,柯希玮,等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术

- 在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 514–522.
- LYU Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei, et al. The development prospect of circulating fluidized bed combustion technology in China under the background of carbon neutralization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 514–522.
- [2] 柯希玮, 蔡润夏, 杨海瑞, 等. 循环流化床燃烧的 NO_x 生成与超低排放[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 390–396.
- KE Xiwei, CAI Runxia, YANG Hairui, et al. NO_x formation and ultra-low emission of circulating fluidized bed combustion[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 38(2): 390–396.
- [3] 岳光溪, 吕俊复, 徐鹏, 等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 1–13.
- YUE Guangxi, LYU Junfu, XU Peng, et al. Development status and prospect analysis of circulating fluidized bed combustion[J]. China Electric Power, 2016, 49(1): 1–13.
- [4] 黄中, 杨娟, 车得福. 大容量循环流化床锅炉技术发展应用现状[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 1–8.
- HUANG Zhong, YANG Juan, CHE Defu. Development and application status of large-capacity circulating fluidized bed boiler technology[J]. Thermal power generation, 2019, 48(6): 1–8.
- [5] 胡仙楠, 邓博宇, 刘欢鹏, 等. 循环流化床锅炉负荷快速调节技术现状及发展趋势[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6): 11–23.
- HU Xiannan, DENG Boyu, LIU Huanpeng, et al. Current status and development trend of rapid load regulation technology for circulating fluidized bed boilers[J]. Clean coal technology, 2023, 29(6): 11–23.
- [6] 姚禹歌, 黄中, 张曼, 等. 中国循环流化床燃烧技术的发展与展望[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 13–19.
- YAO Yuge, HUANG Zhong, ZHANG Man, et al. The development and prospect of circulating fluidized bed combustion technology in China[J]. Thermal power generation, 2021, 50(11): 13–19.
- [7] MIAO M, ZHOU T, ZHANG M, et al. Transformation of CFB boilers pollutant treatment strategies under China's stricter requirements and the background of carbon neutrality[J]. Fuel, 2023, 342: 127009.
- [8] 姜金东, 林晨, 张曜, 等. 工艺操作参数对烟气SNCR脱硝性能影响的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 383–389.
- JIANG Jindong, LIN Chen, ZHANG Yao, et al. Numerical simulation of the effect of process operating parameters on SNCR denitration performance of flue gas[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 38(2): 383–389.
- [9] 王艺. 循环流化床锅炉SNCR脱硝工艺控制系统的实现[J]. 电力科技与环保, 2020, 36(5): 45–48.
- WANG Yi. Implementation of SNCR denitration process control system for circulating fluidized bed boiler[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2020, 36(5): 45–48.
- [10] 史磊, 张世鑫. 循环流化床锅炉SNCR脱硝技术优化改造[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(6): 107–111.
- SHI Lei, ZHANG Shixin. Optimization of SNCR denitration technology for circulating fluidized bed boilers[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 107–111.
- [11] 朱愉洁, 韩元, 袁东辉. CFB锅炉SNCR烟气脱硝氨逃逸的控制手段[J]. 电力科技与环保, 2020, 36(2): 18–21.
- ZHU Yujie, HAN Yuan, YUAN Donghui. Control method of ammonia escape from SNCR flue gas denitrification of CFB boiler[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2020, 36(2): 18–21.
- [12] 王继华. SCR、SNCR和SNCR/SCR烟气脱硝技术应用及比较[J]. 电力科技与环保, 2018, 34(5): 35–36.
- WANG Jihua. Application and comparison of SCR, SNCR and SNCR/SCR flue gas denitrification technologies[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2018, 34(5): 35–36.
- [13] 段守保, 辛胜伟, 顾从阳, 等. 循环流化床锅炉低负荷下超低 NO_x 排放研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(S2): 299–303.
- DUAN Shoubao, XIN Shengwei, GU Congyang, et al. Research on ultra-low NO_x emission of circulating fluidized bed boiler under low load[J]. Clean coal technology, 2021, 27(S2): 299–303.
- [14] 辛胜伟, 韩平, 段彩丽, 等. 300 MW机组循环流化床锅炉选择性非催化还原系统模拟及优化研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 122–129.
- XIN Shengwei, HAN Ping, DUAN Caili, et al. Simulation and optimization of selective non-catalytic reduction system for 300 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 122–129.
- [15] 张涛, 戴良旭, 王长安, 等. 燃煤耦合农林废弃物在流化床内燃烧的氮氧化物生成特性模拟研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(5): 692–702.
- ZHANG Tao, DAI Liangxu, WANG Chang'an, et al. Simulation study on nitrogen oxide formation characteristics in co-combustion of coal and agricultural waste in fluidized bed boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(5): 692–702.
- [16] 杨敬池, 王菁, 王鹏程, 等. 超临界350 MW循环流化床锅炉宽负荷 NO_x 排放特性及控制技术[J/OL]. 洁净煤技术, 1–10[2024–09–20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20240124.1553.002.html>.
- YANG Jingchi, WANG Jing, WANG Pengcheng, et al. NO_x emission characteristics and control technology of supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler under wide load[J]. Clean Coal Technology, 1–10[2024–09–20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20240124.1553.002.html>.
- [17] 李月娥, 吴彦丽, 郑立星, 等. 燃煤机组深度调峰脱硝性能提升技术分析[J/OL]. 洁净煤技术, 1–16[2024–09–20]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.23072402>.
- ZLI Yue'e, WU Yanli, ZHENG Lixing, et al. Technical analysis of deep peak regulation and denitrification performance improvement of coal-fired units [J]. Clean Coal Technology: 1–16 [2024–08–16]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.23072402>.
- [18] 张文祥, 徐文韬, 黄亚继, 等. 不同负荷工况下660 MW循环流化

- 床锅炉脱硝特性研究[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(1): 60–67.
- ZHANG Wenxiang, XU Wentao, HUANG Yaji, et al. Research on denitrification characteristics of 660 MW circulating fluidized bed boiler under different load conditions[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(1): 60–67.
- [19] 张海霞, 朱治平, 张思源. 循环流化床高碱煤气化技术研发及应用进展[J]. 化工进展, 2024, 43(5): 2254–2278.
- ZHANG Haixia, ZHU Zhiping, ZHANG Siyuan. Research and application progress of circulating fluidized bed gasification with high-alkaline coal[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(5): 2254–2278.
- [20] 蔡晋, 吴玉新, 张曼, 等. 循环流化床锅炉脱硝工艺经济性分析[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(4): 97–104.
- CAI Jin, WU Yuxin, ZHANG Man, et al. Economic analysis of denitration process for circulating fluidized bed boilers[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 97–104.
- [21] 张媛媛, 曲江源, 苏欣欣, 等. 循环流化床燃煤机组SNCR脱硝过程气液传质和反应特性[J]. 化工学报, 2023, 74(6): 2404–2415.
- ZHANG Yuanyuan, QU Jiangyuan, SU Xinxin, et al. Gas-liquid mass transfer and reaction characteristics of SNCR denitration process in circulating fluidized bed coal-fired units[J]. CIESC Journal, 2023, 74(6): 2404–2415.
- [22] 王威, 金保昇, 王晓佳, 等. 流化床流动和燃烧特性对SNCR脱硝的影响研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(6): 66–73.
- WANG Wei, JIN Baosheng, WANG Xiaojia, et al. Study on the influence of fluidized bed flow and combustion characteristics on SNCR denitration[J]. Thermal Power Engineering, 2016, 31(6): 66–73.
- [23] 蔡仲蕾, 宋蕾, 黄乾泽, 等. 选择性非催化还原脱硝温度窗口内尿素液滴的蒸发和转化特性[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(26): 21–26+1.
- CAI Zhonglei, SONG Qiang, HUANG Qianze, et al. Evaporation and conversion characteristics of urea droplets in selective non-catalytic reduction denitration temperature window[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2013, 33(26): 21–26+1.
- [24] 赵凯, 康利生, 管辉尧, 等. 循环流化床锅炉SNCR脱硝技术研究现状[J]. 节能技术, 2017, 35(6): 514–519.
- ZHAO Kai, KANG Lisheng, GUAN Huiyao, et al. A review of selective non-catalytic reduction (SNCR) denitrification in circulating fluidized bed[J]. Energy Conservation Technology, 2017, 35(6): 514–519.
- [25] 林晨, 于娟, 张曜, 等. 流化床模拟烟气中喷射混合还原剂脱硝反应研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 148–155.
- LIN Chen, YU Juan, ZHANG Yao, et al. Study on denitration reaction in simulating flue gas of fluidized bed with mixed reducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 148–155.
- [26] 李明磊, 张海龙, 杨明强. 循环流化床锅炉SNCR反应机理与脱硝特性数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(3): 96–102.
- LI Minglei, ZHANG Hailong, YANG Mingqiang. Numerical simulation of SNCR reaction mechanism and denitration characteristics of circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(3): 96–102.
- [27] 姜恒, 谢玉婷, 刘海玉, 等. 300 MW CFB锅炉旋风分离器改造数值模拟研究[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(1): 87–94.
- JIANG Heng, XIE Yuting, LIU Haiyu, et al. Numerical simulation study on cyclone separator retrofit of 300 MW CFB boiler[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(1): 87–94.
- [28] 原奇鑫. 超临界CFB旋风分离器选择性非催化还原脱硝特性模拟[J]. 热能动力工程, 2019, 34(8): 109–115.
- YUAN Qixin. Simulation of SNCR denitrification in a cyclone separator of supercritical circulating fluidized bed[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(8): 109–115.
- [29] TOMÁŠ B, JAROSLAV K, BERND V D H, et al. High temperature modification of SNCR technology and its impact on NO_x removal process[J]. EPJ Web of Conferences, 2018, 180: 02009.



第一作者简介:王 兴(1983—),男,高级工程师,主要从事电站锅炉优化运行及污染物脱除方面的研究工作, wangxing6boy@163.com;



乔 杰(1996—),男,硕士研究生,主要从事火电厂污染物控制和煤的清洁燃烧等方面的研究, 13656423389@163.com;



王 东(1979—),男,高级工程师,主要从事燃煤机组高效发电技术和智慧发电技术等方面的研究, 12014225@ceic.com;



王 磊,(1980—),男,高级工程师,主要从事火电厂智慧发电技术等方面的研究, 12019660@ceic.com;



张志强(1979—),教授级高级工程师,主要从事煤电节能环保、煤电低碳化等研究工作, 2055376624@qq.com;



林正根(1984—),男,工程师,主要从事电力环境保护等方面的研究, 12084634@ceic.com。

(编辑 林正根)