SCR 脱硝装置大颗粒灰拦截网压降特性

孟 磊1,雷 彧2,陈 晟2,刘小伟2,岳朴杰1,谷小兵1

(1.大唐环境产业集团股份有限公司,北京 100097;2.华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:燃煤烟气中毫米以上的大颗粒灰会导致 SCR 烟气脱硝装置中的催化剂堵塞与磨损,影 响 SCR 催化剂的使用寿命及脱硝性能。在烟道中加装拦截网装置对大颗粒灰进行拦截可有效解决 该问题。目前拦截网的设计主要依赖试验测量与工程经验,缺少通用设计准则与理论依据,对其压降 影响因素的探究不够深入。准确计算拦截网压降特性对于开发高效、低成本、低压降拦截装置具有重 要意义。利用 Ansys Fluent 计算流体力学的方法构建了拦截网局部网孔附近的计算模型,探究了拦 截网开孔形状、烟气流速、开孔率以及拦截网厚度等参数对拦截网压降的影响。结果表明,烟气流速 和拦截网的开孔率是影响压降的主要因素:流速 5~20 m/s 时,压降约与流速的 2 次方成正比;拦截 网开孔率为 40%~65%时,压降约与开孔率的 3 次方成反比。开孔率相同时,改变网孔形状对压降影 响较小。在临界尺寸相同的条件下长条形拦截网压降最小。拦截网厚度为 6~18 mm 时,压降随厚度 呈准线性增加。基于大量模拟数据,给出了拦截网压降最小。拦截网厚度为 6~18 mm 时,压降随厚度

关键词:选择性催化还原;大颗粒灰;拦截网;CFD 数值模拟;渗透率

中图分类号:X701 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2022)06-0168-07

Pressure drop characteristics of large particle ash interceptor in SCR flue gas denitrification system

MENG Lei¹, LEI Yu², CHEN Sheng², LIU Xiaowei², YUE Pujie¹, GU Xiaobing¹

(1. Datang Environment Industry Group Co., Ltd., Beijing 100097, China; 2. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University

of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The large ash particles in the flue gas from coal combustion would lead to severe blockage and wear problems of the catalyst in a selective catalytic reduction (SCR) denitrification system, which affects the service life and denitration performance of SCR catalyst. This problem can be effectively solved by installing an interception net device in the flue to intercept large particle ash. The design of interceptor mainly depends on experimental measurement and engineering experience, which lacks general design criteria and theoretical basis, and the research on influence factors of pressure drop is not deeply explored. It is of significance for developing an effective and low-cost interceptor to calculate accurately the pressure drop of the flow across the interceptor with different pore structures. The influences of pore structure, flue gas velocity, interceptor porosity and thickness on the pressure drop were investigated based on computational fluid dynamics by construct the calculation model of interceptor mesh. The simulation results show that controlling parameters on pressure drop are the flow velocity and the porosity. The pressure drop is a quadratic power function of the flow velocity within the range of 5-20 m/s and inversely proportional to the third power of the porosity when the porosity of the interceptor network is 40%-65%. It is also found that, given the condition of the same critical size. The pressure drop increases quasi-linearly with the thickness of interceptor increase in the range 6-18 mm. Based on a large number of simulation data, A correlation is then proposed to predict the pressure drop and the empirical expression of the equivalent porous medium permeability of the interception network is further deduced, which can be feasibly applied to

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52006084)

收稿日期:2021-06-09;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.21060903

作者简介:孟 磊(1985—),男,山西定襄人,高级工程师,博士。E-mail:mengl@dteg.com.cn

通讯作者:陈 晟(1992—),男,浙江杭州人,副研究员,博士。E-mail:sheng_chen@hust.edu.cn

引用格式: 孟磊, 雷彧, 陈晟, 等. SCR 脱硝装置大颗粒灰拦截网压降特性[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 168-174.

MENG Lei, LEI Yu, CHEN Sheng, et al. Pressure drop characteristics of large particle ash interceptor in SCR flue gas denitrification system[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(6):168-174.

full-scale CFD simulation of SCR denitrification system.

Key words: selective catalytic reduction; large particle ash; interceptor; CFD simulation; permeability

0 引 言

选择性催化还原(Selective Catalytic Reduction, SCR)技术是我国当前燃煤锅炉最主要 脱硝手段^[1-3]。我国燃煤锅炉的 SCR 脱硝装置几 乎全为无烟气旁路的高尘布置[4],烟气中颗粒会 导致催化剂磨损和堵塞。堵塞严重不仅会大幅降 低装置脱硝性能,甚至会导致主机非计划停机^[5]。 其中,烟气中尺寸大于催化剂通道的大颗粒灰是 引起堵塞的重要原因^[6-9]。目前国内外针对 SCR 装置前的大颗粒灰防治技术可大致分为2类: ① 对省煤器灰斗进行改造,通过增设挡板、导流 板、扩容等方式调整流场结构[10-12],利用惯性将大 颗粒灰从烟气中分离出来[13];② 加装大颗粒灰拦 截网,在合适位置安装带孔拦截网,保证烟气通过 的情况下分离出大颗粒灰[14-16]。相比于前者,加 装拦截网技术具有对流场设计要求低、捕集效率 高、改造与安装方便等优点。目前,大颗粒灰拦截 装置已在国内百万机组选择性催化还原脱硝系统 上成功应用^[17]。然而,目前拦截网的设计依赖于 试验测量与工程经验,缺少通用设计准则与理论 依据,对于拦截网开孔形状、烟气流速、开孔率以 及拦截网厚度等参数对拦截效率以及压降的影响 认识尚不深入。

针对上述问题,金理鹏等^[18]研究了拦截网开孔 形状、外形结构与安装位置对拦灰效率和系统阻力 的影响,发现拦截网压降与开孔率的3次方成反比, 同时对比了屋脊式和平板式拦截网,发现二者阻力、 拦灰效果基本相同。陈鸿伟等^[19]通过冷态试验发 现长条形孔型的拦截网性能优于正方形开孔的拦截 网,拦截网引起的压降为140~160 Pa,大颗粒灰拦 截效率可达 92.2%,发现拦截网安装角度与长度均 会影响压降。上述试验进一步验证了大颗粒灰拦截 技术的可行性,但实际工程中对于拦截网压降的要 求较高,可接受的压降范围通常在150 Pa以内,在 保证拦截效果的前提下应使压降尽可能小。目前, 试验中拦截网引起的压降仍较大,存在优化空间。 此外,试验手段难以对拦截网孔型、安装位置、角度 以及长度等参数同时全面测量从而找到最优参数。 相比之下,计算流体力学方法(Computational Fluid Dynamics, CFD)能够便捷地改变设计参数进行扫描 计算,从而获得拦截网最优设计方案。

由于拦截网网孔尺远小于烟道尺寸,CFD 计算 建模长度尺度跨度大,因此常采用多孔介质对拦截 网进行等效模拟,基于拦截网孔隙率和渗透率等宏 观参数即可等效求解出流场经过拦截网的压力损 失。已有研究采用 CFD 方法模拟了拦截网安装在 省煤器灰斗上方时的流场分布[16],对拦截网单元 和 SCR 系统整体流场分别进行了模拟,获得流场分 布、压降信息[17]以及大颗粒灰运动轨迹[20]。其中 渗透率表示多孔介质允许流体通过空隙流动能力的 强弱,其大小与孔隙率、流体渗透方向上空隙的几何 形状、颗粒大小以及排列方向等因素有关。等效多 孔介质渗透率的准确估计对提升整体设备流场解的 精确度具有重要意义,但并未对渗透率设置依据进 行详细探讨。笔者通过 CFD 方法,利用 Ansys Fluent 仿真软件对网孔尺度流场进行求解,探究拦 截网开孔形状、烟气流速、开孔率以及拦截网厚度 等参数对拦截网压降的影响,进一步推导了达西 定律下等效多孔介质渗透率的关联公式,对 于 SCR 系统整体 CFD 模拟以及拦截网选型设计 具有重要意义。

1 研究方法

1.1 CFD 计算模型

研究选取了3种最常见开孔形状的拦截网作为 研究对象:长条形、正六边形和正方形拦截网。由 于 SCR 催化剂通道的孔径尺寸限制,粒径大于 4 mm 的大颗粒灰即可造成催化剂床层堵塞^[14]。为 衡量拦截网对不同粒径大颗粒灰的拦截效果,将拦 截网可拦截的最小颗粒尺寸定义为"临界尺寸"。 不同开孔形状拦截网的临界尺寸如图 1(a) 所示,其 中a为临界尺寸,x为相邻网孔间的距离, λ 为长条 形网孔的长宽比,六边形、正方形的临界尺寸为其开 孔的内接圆直径,长条形的临界尺寸为其开孔宽度, 当3者的临界尺寸一致,即可认为3者拦截效果一 致。利用 Ansys Fluent 仿真软件按照 1:1 比例建 立了拦截网局部网孔的三维模型,以长条形拦截网 为例(图1(b)),计算区域为网孔单位附近一个长 方体区域,左侧为烟气入口,右侧为压力出口,具体 参数见表 1. 其余边界均设置为周期性边界条件。 模拟采用有限元分析法进行计算,在网格划分时对 拦截网单元附近等小尺度空间结构进行了网格加密 处理,网格总数约200万个。



图1 拦截网局部 CFD 计算模型

Fig.1 Pore-scale CFD model of interceptor

表 1	模拟工况参数条件

Table 1Physical parameters for the simulations

参数		数值
入口流速/(m・s ⁻¹)		5.1,15.5,19.6
烟气温度/K		660
烟气黏度/(Pa・s)		3.21×10 ⁻⁵
出口压力/Pa		0
最小拦截粒径/mm		5
拦截网厚度/mm		6
拦截网开 孔率/%	长条形	57.8
	正六边形	52.6
	正方形	46.9

1.2 控制方程

170

根据实际情况对模型做出如下简化:来流烟气 为不可压缩牛顿流体;烟气在入口边界处均匀分布 且完全垂直于入口截面;烟气之间的不同组分不发 生化学反应,物性参数为常数。流体的控制方程包 括连续性方程与动量方程,表达式为

$$\rho \nabla \boldsymbol{u} = \boldsymbol{0}, \qquad (1)$$

$$\rho(\boldsymbol{u}\nabla)\boldsymbol{u} = \nabla(-p\boldsymbol{I} + \boldsymbol{K}) + \boldsymbol{F}_{\circ} \qquad (2)$$

其中, ρ 为流体密度,kg/m³;u为流体的速度矢量,m/s;p为微元流体上的压强,Pa;I为单位矩阵; F为单位体积流体所受外力,N,本文只考虑流体所 受重力,故 $F = \rho g, g$ 为重力加速度,m/s²;K为黏性 应力,Pa,其表达式为

$$\boldsymbol{K} = (\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\mu}_{\mathrm{T}}) \left(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{\mathrm{T}} \right)_{\circ} \qquad (3)$$

其中, μ 为流体动力学黏度, Pa · s; μ_T 为湍流 黏度, Pa · s, 其表达式为

$$\mu_{\rm T} = \frac{\rho C_{\mu} k^2}{\varepsilon} \,. \tag{4}$$

其中,*C*_μ为模型常数;*k*为湍动能,J;ε为湍动 能耗散率。烟气的流动状态为湍流,研究选取典型 的*k*-ε模型对其进行模拟。

2 结果与讨论

入口气流速度为 15.5 m/s 时,3 种不同开孔形 状拦截网的速度分布与表观压力分布的截面图如图 2 所示,可知网孔后侧存在高速区域,实体结构后侧 则存在一个低速区域。流场不均匀性在拦截网后侧 较短区域内逐渐衰减,最终流场变得均匀。不同开 孔形状的拦截网后侧流场结构相似,可以推断不同 孔型拦截网对于烟气整体流场影响规律接近。气流 表压在拦截网前后产生明显变化,在其他区域几乎 没有变化。因此,计算域入口和出口的压力差可以 定义为拦截网压降,后续对不同条件下的压降规律 进行详细分析。



2.1 开孔形状对压降的影响

3种拦截网在典型烟气流速下的压降情况见表 2,其中流速大小 5.1、15.5、19.6 m/s 分别对应国内 某 600 MW 燃煤锅炉满负荷工况下省煤器灰斗上 方、水平缓流烟道、竖直烟道截面的平均流速。可知 在最小拦截粒径(即临界尺寸)均为5 mm 的条件 下,压降最大的是正方形拦截网,其次为正六边形拦 截网,压降最小的是长条形拦截网。对比文献[13] 试验结果,开孔率为48.5%~61.0%的平板式拦截网 安装在竖直烟道时(对应本文流速 19.6 m/s 的工 况),试验压降在169~414 Pa,二者在开孔率接近的 工况点数据较为吻合,验证了模拟结果的可靠性。 不同开孔形状拦截网在不同入口流速时的压降变化 如图3所示,可知3种拦截网压降均随入口流速增 大而增大,且在本文研究流速范围内,仍符合长条形 拦截网的压降最小、正六边形其次、正方形压降最大 这一规律,且随着流速增大3者差别越明显。

表 2 典型流速下 3 种拦截网的压降

 Table 2
 Pressure drops of interceptors at typical flow velocities

入口流速/		压降/Pa	
$(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	长条形	正六边形	正方形
5.1	20.3	32.8	41.5
15.5	145.7	235.2	345.5
19.6	239.1	360.1	542.1





Fig.3 Relationship between pressure drop and flow velocity of interceptor with different pore structures

分析认为造成长条形拦截网压降小的原因是其 开孔率较高。开孔率X 定义为网孔面积 S₀与拦截网 总面积 S 的比值,是拦截网的重要设计参数,其表达 式为

$$\chi = \frac{S_0}{S^{\circ}}$$
(5)

比较3种拦截网的开孔率(表1)可知,在相同

拦截效果(即临界颗粒尺寸相同)前提下,长条形拦 截网开孔率最高,其次是正六边形,正方形最小,这 与拦截网压降规律一致。又由于长条形拦截网的开 孔率与其长宽比相关,保持流速不变进一步模拟了 不同长宽比(开孔率)下的长条形拦截网的压降情 况见表3,证明长条形拦截网的压降随着长宽比(开 孔率)增大而减小。

表 3 长条形长宽比对开孔率及压降的影响

 Table 3 Influence of length-to-width ratio on porosity and pressure drop

项目	37 mm×5 mm	30 mm×5 mm	20 mm×5 mm	10 mm×5 mm
开孔率/%	57.8	56.8	54.3	48.1
压降/Pa	145.67	155.33	185.53	291.56

结果表明,开孔率与烟气流速是影响压降的重 要因素,开孔形状对压降的影响可能源自开孔率的 变化,下文将对开孔率及烟气流速的影响进行定量 描述。

2.2 开孔率和烟气流速对压降的影响

基于第 2.1 节结论,进一步探究开孔率对压降 的影响。通过改变开孔孔径、相邻网孔的距离等方 式改变拦截网的开孔率*X*,模拟计算 3 种孔型拦截 网在不同开孔率(通过改变临界尺寸实现)、不同流 速下的压降情况,如图 4 所示。



图4 拦截网压降与开孔率的关系

Fig.4 Relationship between interceptor pressure drop and porosity

使用幂函数对相同流速下的数据点进行拟合, 具体为

$$\Delta P = C \chi^{\beta}, \qquad (6)$$

式中, ΔP 为压降, Pa; C 为拟合系数, Pa; β 为经验 常数。

可知 3 个流速下的拟合曲线决定系数分别为 0.994、0.998、0.992。同一流速下不同开孔形状的数 据点均分布在同一条曲线附近,证明拦截网压降主 要与开孔率相关,开孔率越高压降越小。在相同开 孔率下,开孔形状对拦截网压降的影响几乎可以忽 略。不同流速下的压降随开孔率变化规律类似,流 速增加会使压降曲线上移。

根据以上结果,可以推断出实际拦截网设计时, 在确保拦截效果前提下,尽量选取开孔率较高的孔 型(即长条形),同时应综合考虑结构强度、加工成 本等因素后进行选型设计。

2.3 拦截网厚度对压降的影响

为探究拦截网厚度对其压降的影响,改变拦截 网厚度 n,计算入口流速 5.1 m/s 时 3 种孔型拦截网 在不同开孔率下的压降情况,如图 5 所示(蓝色、橙 色和红色代表厚度分别为 6、12、18 mm),曲线为 n= 6 mm 的压降拟合曲线。由图 5 可知,随厚度增加, 相同开孔率拦截网的压降均小幅增加。为了更清晰 展示拦截网厚度的影响,选取开孔率为 0.51 的拦截 网,绘制压降随厚度变化关系(图 6)。可知随厚度 增加,压降呈准线性增加。在实际工程应用中,受限 于加工难度和结构强度等,拦截网厚度变化范围有 限,与烟气流速和开孔率相比,拦截网厚度对压降影 响较小。



图 5 拦截网压降与厚度的关系









2.4 压降及渗透率关联式

拦截网开孔率、厚度以及流速对拦截网压降的

影响可用幂函数的形式来量化,因此将拦截网压降进行拟合:

$$\Delta P = (An + B) u^{\alpha} \chi^{\beta} \,_{\circ} \tag{7}$$

其中, *u* 为拦截网区域烟气流速, m/s; *A* 、*B* 、α 均为经验常数, *A* 单位为 Pa · s^α · m^{-α-1}, *B* 单位为 Pa · s^α · m^{-α}。对大量不同模拟工况下的数据点进行拟合, 得到:

$$\Delta P = (2.12n + 0.24) u^{1.82} \chi^{-2.87} \tag{8}$$

可知式(8)的拟合决定系数为 0.996, 平均绝对 百分比误差为 3.4%, 拟合效果良好。已有研究报道 拦截网阻力与其开孔率的 3 次方成反比^[13], 即 $\Delta P \propto \chi^{-3}$,这与式(8)规律接近, 验证了该拟合公式 的可靠性。选取 110 个不同开孔形状、烟气流速、开 孔率以及拦截网厚度组合工况, 以模拟计算得到的 压降为横坐标, 以关联式(8)预测压降为纵坐标, 将 数据点绘制于图 7, 当数据点位于 y = x 实线上时, 表 明公式预测与模拟结果吻合。可知所有数据点均位 于±10%误差范围内(图 7 虚线), 证明上述关联公 式在流速 5~20 m/s、拦截网开孔率 40%~65%、厚 度 6~18 mm 的工况下可以综合反映三者对压降的 影响。



Fig.7 Prediction of pressure drop (Eq.(8)) versus simulation results

对实际 SCR 系统进行 CFD 设计计算,通常采用 多孔介质对拦截网进行等效模拟,即采用多孔介质 代替具体的拦截网结构型式,基于拦截网开孔率和 渗透率等宏观参数可以求解出流场经过拦截网的压 力损失。渗透率 k₁的计算通常基于达西定律,具 体为

$$k_1 = \frac{Q\mu L}{\Delta P A_0}$$
(9)

其中,Q 为单位时间渗流量,m³/s;L 为渗流长 度,m;A₀为流体通过多孔介质的截面积,m²。该定 律将流量、流体的物理性质及多孔介质的压力梯度 相联系。将压降公式代入基于达西定律的渗透率定 义式,得到等效多孔介质渗透率 k₁ 为

$$k_1 = \frac{\mu n}{(2.12n + 0.24) u^{0.82} \chi^{-2.87}}$$
(10)

以上拟合公式为预测拦截网压降以及设备尺度 CFD 等效模拟提供基础,具有一定参考指导意义。

3 结 论

1)影响拦截网压降的主要因素为气流速度和 拦截网开孔率。流速 5~20 m/s、开孔率 40%~65% 时,拦截网压降约与烟气流速的 2 次方成正比,与开 孔率的 3 次方成反比。

2)拦截网压降与开孔形状无明显关联,不同拦截网开孔形状对拦截网压降的影响主要通过开孔率变化实现。在确保拦截效果前提下,应尽量选取开孔率较高的孔型(如大长宽比的长条形)。

3) 拦截网厚度为 6~18 mm 时, 压降随厚度增加呈准线性增加, 但受限于工程实际应用, 拦截网厚度可变范围小, 故其对压降的影响也较小。

4) 基于模拟数据, 给出了幂函数形式的压降预 测公式, 描述压降与开孔率、流速、厚度之间的关联, 并进一步推导了拦截网等效多孔介质渗透率的经验 表达式, 为拦截网的选型设计及全尺度模拟计算提 供理论依据。

参考文献(References):

[1] 李春雨.我国火电厂 SCR 烟气脱硝技术研究及应用综述[J].
 能源环境保护,2015,29(5):8-12.

LI Chunyu. Investigation and engineering application about denitrification technology with selective catalytic reduction [J]. Energy and Environmental Protection, 2015, 29(5):8–12.

- [2] 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 Hongwei, LUO Min, WANG Yuanxin, 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.
- [3] 王春兰,宋浩,韩东琴.SCR 脱硝催化剂再生技术的发展及应用[J].中国环保产业,2014(4):22-25.
 WANG Chunlan,SONG Hao,HAN Dongqin. Development and application of recycling technology of SCR denitration catalytic agent [J]. China Environmental Protection Industry,2014(4):22-25.
- [4] 张杨,杨用龙,冯前伟,等.燃煤电厂 SCR 烟气脱硝改造工程关 键技术[J].中国电力,2015,48(4):32-35.
 ZHANG Yang, YANG Yonglong, FENG Qianwei, et al. Key technical issues of SCR denitrification from coal - fired boiler flue gas [J]. Electric Power,2015,48(4):32-35.
- [5] 何金亮,金理鹏,卢承政,等.燃煤电站 SCR 烟气脱硝系统运行 典型故障诊断[J].中国电力,2016,49(8):148-153.
 HE Jinliang, JIN Lipeng, LU Chengzheng, et al. Diagnosis of

typical operation faults of SCR flue gas denitrification system in coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2016, 49(8): 148–153.

- [6] VENKATAHARIBABU C, DAVID W M, HENG B, et al. Aerodynamic characteristics of popcorn ash particles [J]. Particulate Science & Technology, 2007, 25(3):275-287.
- [7] 邓淮铭,陈鸿伟,赵超,等.积灰坍塌对催化剂堵塞问题影响实验研究[J].电力科学与工程,2017,33(6):55-59.
 DENG Huaiming, CHEN Hongwei, ZHAO Chao, et al. Experimental study on the effect of deposited ash collapse on catalyst blockage
 [J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(6): 55-59.
- [8] XU Y,ZHANG Y,LIU F, et al. CFD analysis on the catalyst layer breakage failure of an SCR-DeNO_x system for a 350 MW coalfired power plant [J]. Computers & Chemical Engineering, 2014 (69):119-127.
- [9] 王远鑫,翟建军,陈鸿伟,等.国内某电厂 SCR 催化剂格栅堵塞 研究[J].电力科学与工程,2016,32(6):63-67.
 WANG Yuanxin, ZHAI Jianjun, CHEN Hongwei, et al. Study on SCR catalyst grid blockage of a power plant in China[J]. Electric Power Science and Engineering,2016,32(6):63-67.
- [10] 郑妍,姚宣,王冬生,等.大型燃煤机组 SCR 装置超低排放改 造流场优化[J].洁净煤技术,2021,27(5):212-217.
 ZHENG Yan, YAO Xuan, WANG Dongsheng, et al. Flow field optimization of SCR system in large size coal-fired units NO_x ultralow emission modification[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27 (5):212-217.
- [11] 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. Study on the numerical simulation of flow field optimization in SCR system
 [J]. Clean Coal Technology,2020,26(4):147-153.
- [12] 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, et al. Optimization of SCR denitrification system for 350 MW unit boiler[J].Clean Coal Technology,2020,26(1):221-227.
- [13] EPRI. Large particle ash mitigation measures: Preliminary findings from CFD modeling[R]. Palo Alto: EPRI, 2005.
- [14] 汪洋, 胡永锋. 燃煤电站选择性催化还原脱硝系统预防大颗 粒灰堵塞的方法[J]. 华电技术,2013,35(2):66-72.
 WANG Yang, HU Yongfeng. Methods to prevent blockage fault of SCR deNO_x system caused by large particles ash in coal-fired power plant[J]. Huadian technology,2013,35(2):66-72.
- [15] RYAN Anthony Michael, JOHN Bryce St. SCR system design considerations for "popcorn" ash [C]//Combined Power Plant Air Pollutant Control Mega Symposium. Washington DC: [s. n.], 2003;1-8.
- [16] 刘希念,唐晶,张家宽,等.超超临界机组 SCR 脱硝系统大颗 粒灰拦截技术[J].发电设备,2019,33(2):112-114.
 LIU Xinian,TANG Jing,ZHANG Jiakuan, et al. Interception technology for large particles from flue gas of SCR denitrification systems in supercritical units[J]. Power Equipment,2019,33(2):

112-114.

[17] 单文盼,刘安阳,李丁辉,等.燃煤电厂 SCR 烟气脱硝设备大颗粒灰拦截技术的应用研究[J].电力科技与环保,2018,34
 (2):20-23.

SHAN Wenpan, LIU Anyang, LI Dinghui, et al. Application research of large particle ash intercepting technology in SCR flue gas denitrification equipment of coal-fired power plant [J]. Power Technology and Environmental Protection, 2018, 34(2): 20–23.

[18] 金理鹏,谢新华,黄飞,等.SCR 脱硝装置大颗粒灰拦截技术试验研究[J].中国电力,2018,51(2):156-161.

JIN Lipeng, XIE Xinhua, HUANG Fei, et al. Experimental study on interception technology of large particle ash in SCR denitrification plant [J]. Electric Power, 2018, 51(2):156-161. [19] 陈鸿伟,许文良,杨新,等.省煤器灰斗出口布置拦截网对大颗 粒灰捕集效率影响实验研究[J].热能动力工程,2017,32
 (12):96-101.
 CHEN Hongwei, XU Wenliang, YANG Xin, et al. Experimental

research on the trapping efficiency of large particle ash screen installed at the economizer hoppers' outlet [J]. Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(12):96-101.

[20] 赵大周,李允超,郑文广,等.省煤器出口加挡板对除灰性能影响的数值模拟[J].环境工程学报,2017,11(9):5104-5108.
 ZHAO Dazhou,LI Yunchao,ZHENG Wenguang, et al. Numerical simulation on effect of ash removal by adding baffle at outlet of economizer[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(9):5104-5108.