燃煤工业锅炉飞灰回用鼓泡(乳化)湿法脱硫除尘一体化系统研究

赵　雪[1,2],罗楠洋[2],韩枝宏[2],薛　瑜[2],黄成梠[2],张巧铃[2],吕钊敏[1],谭厚章[1]
(1.西安交通大学 能源与动力工程学院,陕西 西安　710049;2.福建永恒能源管理有限公司,福建 泉州　362200)

摘　要: 针对目前工业锅炉石灰石湿法脱硫系统易堵塞、运行费用高等问题,开发了一种新型燃煤工业锅炉飞灰回用鼓泡(乳化)湿法脱硫除尘一体化系统,改变传统粉煤灰脱硫仅作为脱硫剂载体直接喷入烟道的利用方式,通过提纯粉煤灰中 Ca^{2+} 离子制成碱性浆液实现粉煤灰湿法脱硫,不需添加其他脱硫剂。同时新型脱硫系统不设置喷头装置,通过"飓风旋流器"让烟气切割脱硫剂形成乳化层达到增加反应时间和反应面积的效果。通过某 14 MW 工业热水锅炉应用结果表明:高、中、低 3 种负荷下,新型脱硫系统均运行稳定,平均入口烟气温度为 100 ℃,较改造前锅炉排烟温度降低 30~50 ℃,有效提升了锅炉热效率;中负荷运行条件下,经新型脱硫系统脱硫后 SO_2 含量为 10.9 mg/m^3,脱硫效率 91.2%,同时脱硫系统协同除尘效率达 98.94%,再经湿式静电除尘(雾)器深度除尘后烟尘浓度为 4.8 mg/m^3,达到超低排放标准。该系统解决了传统石灰石湿法脱硫喷头装置易堵塞问题,同时省却了传统布袋除尘器,运营成本低,具有良好的推广前景。

关键词: 工业锅炉;粉煤灰;一体化净化塔;飓风旋流;湿法脱硫;超低排放
中图分类号: TQ53;TK114　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1006-6772(2021)04-0011-06

Research on integrated bubbling(emulsification) wet desulfurization and dust removal system for reuse of fly ash from coal-fired industrial boiler

ZHAO Xue[1,2],LUO Nanyang[2],HAN Zhihong[2],XUE Yu[2],HUANG Chenglyu[2],
ZHANG Qiaoling[2],LYU Zhaomin[1],TAN Houzhang[1]
(1.*School of Energy and Power Engineering*,*Xi'an Jiaotong University*,*Xi'an*　710049,*China*;
2.*Fujian Eternal Energy Management Co.*,*Ltd.*,*Quanzhou*　362200,*China*)

Abstract: In view of the problems of easy blockage and high operating costs of limestone-gypsum wet flue-gas desulfurization systems,a new type of integrated bubbling(emulsifying) wet desulfurization and dust removal system for fly ash recycling of coal-fired industrial boiler was developed. The traditional fly ash desulfurization is only used as a desulfurizer carrier and directly sprayed into the flue. By purifying the Ca^{2+} in the fly ash to prepare an alkaline slurry,wet desulfurization of fly ash can be achieved without adding other desulfurizers. At the same time,the new desulfurization system does not set nozzle device,and the "hurricane cyclone" allows the flue gas to cut the desulfurizer to form an emulsifying layer,so as to increase the reaction time and reaction area of the effect. The application results of a 14 MW industrial hot water boiler show that the new desulfurization system runs stably under high,medium and low loads,and the average inlet flue gas temperature is 100 ℃,which is 30-50 ℃ lower than the boiler exhaust temperature before the renovation,which effectively improves the thermal efficiency of the boiler. Under medium-load operating conditions,the content of SO_2 after desulfurization by the new desulfurization system is 10.9 mg/m^3,and the desulfurization efficiency is 91.2%. At the same time,the synergistic dust removal efficiency of the desulfurization system is 98.94%. After deep dust removal by wet electrostatic precipitator,the smoke concentration is 4.8 mg/m^3,which can meet ultra-low emission standards. The system fundamentally solves the traditional limestone wet desulfurization nozzle device

收稿日期: 2021-04-09;**责任编辑:** 白娅娜　　**DOI:** 10.13226/j.issn.1006-6772.CE21040901
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603902)
作者简介: 赵　雪(1982—),女,河南温县人,主要从事工业锅炉高效应用与污染物治理研究。E-mail:sans@eemco.cn。**通讯作者:** 谭厚章,教授,研究方向为煤粉超低 NO_x 燃烧。E-mail:hzt@xjtu.edu.cn
引用格式: 赵雪,罗楠洋,韩枝宏,等.燃煤工业锅炉飞灰回用鼓泡(乳化)湿法脱硫除尘一体化系统研究[J].洁净煤技术,2021,27(4):11-16.
ZHAO Xue,LUO Nanyang,HAN Zhihong,et al.Research on integrated bubbling(emulsification) wet desulfurization and dust removal system for reuse of fly ash from coal-fired industrial boiler[J].Clean Coal Technology,2021,27(4):11-16.
移动阅读

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

easy blockage problem, and saves the traditional cloth bag dust collector, has low operating cost, and a good promotion prospect.

Key words: industrial boiler; fly ash; integrated purification tower; hurricane swirl; wet desulfurization; ultra-low emission

0 引　言

我国煤炭消费结构中，燃煤工业锅炉每年煤炭消费占全国的 1/3，是仅次于燃煤发电的第二大燃煤型污染源[1]。近年来，随着国家环保标准日益严苛，部分重点地区对工业锅炉执行超低排放标准[2]，SO_x作为限排对象之一目前主要采用湿法烟气脱硫技术脱除，该技术工艺成熟，脱硫效率高，一般选用石灰石作为脱硫吸收剂。但石灰石不易溶于水，电离度和溶解度低，实际运行中电厂通常采用增大循环浆液量来提高脱硫效率，但会导致溶液中$CaSO_4$浓度过高，易造成喷头、除雾器及管线结垢堵塞；同时固体颗粒的存在对管线及泵的磨损较严重，不利于设备长期稳定运行，投资、运行费用非常高[3-5]，因此开发新型烟气脱硫技术一直是研究重点。

煤粉燃烧产物粉煤灰中氧化钙平均含量为 10%～20%，整体呈碱性[6]，理论上说，粉煤灰可用做脱硫剂与烟气中酸性气体 SO_2反应；同时粉煤灰的微观结构表明其中的未燃尽碳具有疏松多孔结构，比表面积大，是很好的烟气脱硫吸附剂。前人研究表明，粉煤灰脱硫过程中，常利用粉煤灰或灰渣作为一种载体，加入熟石灰或黏结剂造粒成型来替代纯石灰脱硫剂直接喷入烟道。美国开发的 ADVACATE 工艺[7]以及日本北海道电力公司[8]运行结果表明，混合脱硫剂脱硫效率可达到 90%左右，虽然脱硫效率较高但仍难以达到中国现行超低排放标准（SO_2<35 mg/m^3），原因在于烟道脱硫本质是气固反应，其反应速率无法与湿法脱硫媲美，同时粉煤灰往往只作为脱硫剂载体，企业仍需使用大量脱硫剂，导致粉煤灰利用效率不高，成本难以降低。若能粉煤灰制成浆液，实现湿法脱硫，其脱硫效率将会大幅增加，因此有必要研究粉煤灰湿法脱硫技术的可行性。

为节省环保成本投入，企业对污染物一体化脱除技术需求日益旺盛。研究表明传统石灰石湿法脱硫工艺通常具有一定的粉尘协同脱除能力，但其粉尘脱除效率波动较大，研究结果差异明显。如朱士芸等[9]采用 10.8 g/m^{3}粉尘作为脱硫塔入口粉尘浓度时，脱硫效率可达到 99%以上；朱杰等[10]研究了不同机组对粉尘的脱除效率，除尘效率最小为 7.54%，最大为 85.88%，差异较大。魏宏鸽等[11]研究了不同试验机组 WFGD 的协同除尘效率在 18%～68%，且对 39 台机组容量 25～1 000 MW 的湿法脱硫装置进行除尘效率试验，并分析除尘效率影响因素，结果表明，试验机组脱硫装置平均除尘效率为 49%。郝强等[12]对国电太原第一热电厂的 50 MW 机组的石灰石石膏湿法烟气脱硫装置进行除尘性能分析，总体除尘效率在 40%～96%，以上研究表明，虽然传统湿法脱硫塔具备一定的除尘能力，但仍难以实现粉尘超低浓度排放，因此本文主要研究如何更高效实现粉煤灰湿法脱硫装置的粉尘协同脱除。

基于此，本文开发了一种燃煤工业锅炉飞灰回用鼓泡（乳化）湿法脱硫除尘一体化系统，通过提纯锅炉燃料燃烧后粉煤灰溶解液中 Ca^{2+}以制备脱硫剂达到 SO_x超低排放目的（无需再使用其他脱硫剂），同时烟气可直接进入脱硫系统，省却了前端布袋除尘器，实现了粉煤灰湿法脱硫及协同除尘，并在某 14 MW 热水锅炉应用，为工业锅炉低成本实现 SO_x超低排放及协同除尘提供技术参考。

1 锅炉概况

该项目原有 4×7 MW 链条锅炉，技改前热效率仅为 70%；因供热面积减少，实际运行为 2 开 2 备。锅炉尾气处理为传统麻石水膜除尘器，无配套脱硫系统。项目地为沿海地带，冬季海陆风较多，现场环境恶劣，锅炉尾气排放严重超标，为匹配实际供热面积，对锅炉机组进行技改，拆除原有 4 台 7 MW 机组，采用一台 14 MW 机组。锅炉燃用煤种工业分析结果为 M_{ad} = 4.12%，A_{ad} = 8.77%，V_{ad} = 31.59%，FC_{ad} = 55.52%，$Q_{net,ad}$ = 26.70 MJ/kg。

2 新型脱硫系统开发与改造

2.1 粉煤灰脱硫剂提纯及湿式脱硫可行性分析

为彻底改变粉煤灰气固反应脱硫的传统利用方式，实现粉煤灰湿法脱硫，不添加其他脱硫剂的情况下实现 SO_x超低排放，本文开发了一套粉煤灰 Ca^{2+}提纯设备，通过溶解-澄清等方法，提取粉煤灰中 Ca^{2+}，使其溶于水后生成碱性浆液进入脱硫设备，通过提纯工艺最大化利用粉煤灰。

浆液进入脱硫设备发生的化学反应为

$$CaO+H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2, \quad (1)$$

$$2Ca(OH)_2+2SO_2 \longrightarrow 2CaSO_3 \cdot 1/2H_2O+H_2O, \quad (2)$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$CaCO_3+H_2O+SO_2 = CaSO_3 \cdot H_2O+CO_2, \quad (3)$$

$$2CaSO_3 \cdot 1/2H_2O+H_2O+2SO_2 = 2Ca(HSO_3)_2, \quad (4)$$

$$2CaSO_3 \cdot 1/2H_2O+3H_2O+O_2 = 2CaSO_4 \cdot 2H_2O。 \quad (5)$$

从化学反应角度考虑,无论何种脱硫工艺,理论上只要一个钙基吸收剂分子就可以吸收一个 SO_2 分子。粉煤灰脱硫工艺总体在气相、液相和固相之间进行,核心在液相中,反应条件非常理想[13]。

2.2　高效除尘脱硫一体化净化塔

2.2.1　乳化脱硫作用

通过提纯粉煤灰制备出脱硫剂后还需要匹配对应的脱硫设备,从影响化学反应速率因素考虑,需发展一套可以增大烟气和脱硫剂的反应面,延长脱硫反应时间的设备。传统湿法脱硫工艺通常采用喷头进行雾化加大液、气反应面,同时浆液不断循环达到提高脱硫效率的目的,但该工艺中浆液 $CaSO_4$ 浓度过饱和,致使喷头堵塞,引发脱硫效率降低、压力升高等问题,增加维护成本。

本文自主研发了一套"高效除尘脱硫一体化净化塔"设备[14]。该设备在烟气进入塔内时进行一道雾化除尘,同时不采用传统喷头雾化的方式,脱硫液直接进入除尘脱硫塔,通过设置"飓风旋流器"让烟气切割脱硫剂,形成乳化层达到增大反应面、延长反应时间的目的。"飓风旋流器"设计阻力 500 Pa,一体化净化塔整体设备设计阻力为 1 000~1 500 Pa,略高于单塔脱硫系统阻力(1 000 Pa)。考虑到本文可以省却前端布袋除尘器(阻力约 1 000 Pa),同时可以避免传统石灰石湿法脱硫造成管线堵塞等带来的压力升高,综合来看一体化净化塔满足现有送风-引风系统的负荷要求,进口流速为正常锅炉烟风管道设计流速,进入飓风旋流器的设计流速为 12~21 m/s。"飓风旋流器"的设计类似风扇叶片原理,通过调整叶片角度来改变旋切风压(图 1)。

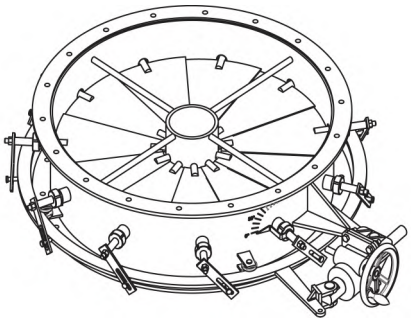


图 1　飓风旋流器示意

Fig.1　Schematic diagram of hurricane cyclone

气动乳化实现方式为在一圆形管状容器中,经加速的含硫烟气以一定角度从容器下端进入容器,与容器上端下流的不稳定循环液碰撞,烟气高速旋切下流循环液,循环液被切碎,气液相互持续碰撞旋切,液粒粉碎得更细,气液充分混合,形成一层稳定的乳化液;烟气量较大时,调大叶片角度增加通过面,反之调小角度,达到气、液平衡。在乳化过程中,乳化液层逐渐增厚,当上升的气动托力与乳化液重力平衡后,最早形成的乳化液被新形成的乳化液取代。

2.2.2　协同除尘作用

本文开发的"高效除尘脱硫一体化净化塔"与传统工业锅炉除尘系统(布袋除尘器-湿式脱硫塔-湿式静电除尘器)相比有以下不同:

1) 由于一体塔内不采用喷头,而是通过"飓风旋流器"使烟气切割脱硫剂的脱硫方式,因此允许炉膛出口烟气直接进入一体塔,省却了前端布袋除尘器的布置,降低了投资成本和维护成本。

2) 省却了布袋除尘器,便无需考虑布袋除尘器内低温腐蚀问题,因此本文在锅炉尾部进入净化塔前增加一道余热回收装置,将烟气温度从 150 ℃ 降至 100 ℃ 左右,提高了锅炉整体热效率。

3) 降温后的烟气进入净化塔,体积收缩发生第 1 步沉降,同时在喷淋的作用下,喷淋浆液大量吸附烟气中粉尘颗粒形成新的粉煤灰溶液,粉煤灰溶液再经后续固液分离器提纯、澄清获得较洁净的脱硫浆液重新循环至喷淋管处。由于脱硫浆液较纯净,可以很好地对烟气进行洗涤,同时配合一体塔气动乳化原理形成的乳化层能汽水结合捕捉烟气中的粉尘,实现较高的除尘效率。

2.2.3　湿式静电除尘器(WESP)

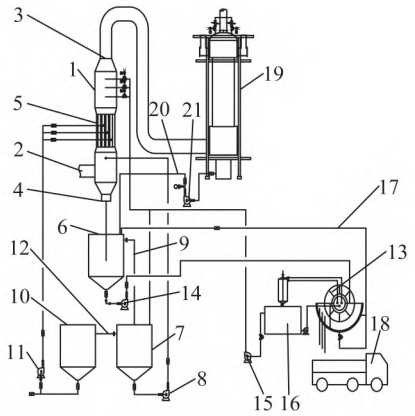
虽然"高效除尘脱硫一体化净化塔"具有较好的粉尘协同脱除能力,但对于细小粒径颗粒尤其是 $PM_{2.5}$ 及更小的亚微米颗粒去除作用非常有限,与传统湿法脱硫系统较一致。细小粉尘很难在吸收塔内脱除,分级脱除效率随粒径减小明显下降,对于亚微米颗粒工况不稳定时甚至出现逆增长现象。因此,"一体塔出口"的烟气需进一步进入湿式静电除尘(雾)器进行除尘、除雾处理[15];湿式静电除尘(雾)器能真正除去 $PM_{2.5}$~PM_{10} 微细粉尘、气溶胶等污染物,减少 $PM_{2.5}$ 排放。由于粉煤灰脱硫塔后烟气温度较低,与大气温差较小,还可有效解决"白羽"问题。

2.2.4　新型脱硫系统流程

新型脱硫系统流程如图 2 所示。净化塔的下端设有烟气入口和下液口,净化塔的上端设有烟气出

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

口和湿式静电除尘(雾)器进口相连接,烟气入口与烟气出口之间形成处理腔室,烟气入口与燃煤锅炉烟气管道连接,处理腔室中自下而上设有烟气降温沉降模块、喷淋除尘模块、乳化脱硫模块以及烟气除雾模块。喷淋管设置在烟气入口上方,乳化脱硫装置设置在喷淋管上方,该系统还包括喷淋罐、循环罐、固液分离器和真空陶瓷脱水机,下液口用导管将净化塔脱硫除尘后的浆液引至固液分离器。浆液在固液分离器中自然静置分层,静置分层过程中粉煤灰中 Ca^{2+} 逐渐溶解到溶液中,完成 Ca^{2+} 的提纯,整个流程不添加任何药剂。固液分离后上层澄清液通过溢流管连接至喷淋罐,喷淋罐通过第二溢流管连接至循环罐。系统还包括脱硫循环泵、喷淋泵和浓浆输送泵,脱硫循环泵从循环底部抽取脱硫液送入净化塔乳化脱硫装置,喷淋泵从喷淋罐底部抽取送入净化塔喷淋管,浓浆输送泵从固液分离器底部抽取浆液送至真空陶瓷脱水机进行浆液脱水;浆液经脱水后湿灰含水率约 15%,不易产生扬尘,虽然湿灰中含带了脱硫后的二水石膏,但二水石膏的量相对湿灰量来说非常小,自然堆积不会形成结块或硬化,可由湿灰输送车(渣土车或农用斗车)拉运至回收站,如砖厂、水泥厂、农业耕地等[16]。



1—净化塔;2—烟气入口;3—烟气出口;4—下液口;5—乳化脱硫装置;6—固液分离器;7—喷淋罐;8—喷淋泵;9—溢流管;10—循环罐;11—脱硫循环泵;12—第二溢流管;13—陶瓷脱水机;14—浓浆输送泵;15—冲洗泵;16—清水池;17—溢流管道;18—湿灰输送车;19—湿法静电除尘器;20—输送管道;21—输送泵

图 2　系统流程

Fig.2　Schematic diagram of the system

3　现场试验测量

3.1　测量依据及方法

改造完毕后,对 SO_2 及烟尘取样测量,SO_2 采用 HJ/T 57—2017《固定污染源排气中二氧化硫的测定 定点位电解法》,烟尘采用 HJ 836—2017《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》。一体化脱硫系统中,脱硫旋流管启用 1 根大管(直径 D_n = 800 mm)和 1 根小管(D_n = 600 mm),旋流开度为 1/2,试验选取高、中、低 3 种负荷(表 1)。低负荷和中负荷脱硫塔旋流器开启 1 根大管和 1 根小管,高负荷测试时因大管脱硫循环泵故障,只启动 1 台脱硫循环泵,但加大喷淋泵频率到 35 Hz,以降低脱硫塔出口粉尘浓度,保证湿电除尘器试验准确性。

表 1　脱硫系统开启说明

Table 1　Opening instructions of desulfurization system

锅炉负荷	小管脱硫泵频率/Hz	大管脱硫泵频率/Hz	旋流器开度	喷淋泵频率/Hz
低、中	30	30	1/2	27
高	30	0	1/2	35

3.2　脱硫塔入口烟气温度

新型脱硫除尘一体化系统不需考虑传统布袋除尘器低温腐蚀问题,允许回收热量后的低温烟气直接进入,一体净化塔入口烟气温度如图 3 所示。可知锅炉低负荷、中负荷和高负荷运行时入口烟气平均温度为 100 ℃,极大提高了锅炉热效率。

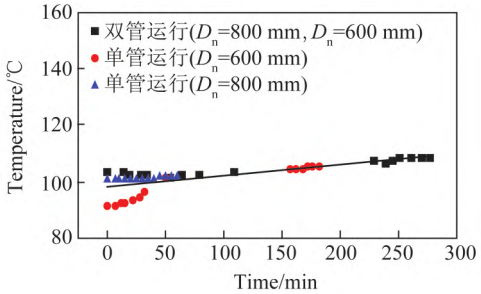


图 3　一体净化塔入口烟气温度

Fig.3　Flue gas temperature at inlet of integral purification tower

3.3　粉尘及 SO_2 测量结果

对一体净化塔进出口以及烟囱出口的粉尘及 SO_2 进行测量,烟尘测试数据见表 2、3。可知一体净化塔系统对粉尘具有较强的脱除能力,以中负荷、入口标杆烟气流量 8 802 Nm^3/h 工况为例,进入高效除尘脱硫一体化净化塔前烟尘浓度为 6 325.4 mg/m^3,净化塔除尘后烟尘浓度为 67.2 mg/m^3,除尘效率为 98.94%。再经湿式静电除尘(雾)器深度除尘后烟尘浓度为 4.8 mg/m^3,除尘效率为92.86%,与天然气的烟尘排放浓度相当。说明高效除尘脱硫一体化净化塔具有较高的粉尘协同脱除能力,但对于微细颗粒物仍需利用湿式静电除尘器脱除。

高效除尘脱硫一体化净化塔进出口和烟囱出口的 SO_2 测量数据见表 4、5。以中负荷、入口标杆烟气

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　一体净化塔烟尘测试数据

Table 2　SDust test data of integrated purification tower

项目	采样点	标干风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	烟尘含量/($mg \cdot m^{-3}$)	除尘效率/%
低负荷	入口	8 000	3 475.9	94.60
	出口	8 370	186.5	
中负荷	入口	8 802	6 325.4	98.94
	出口	9 454	67.2	
	入口	10 100	5 271.5	98.30
	出口	10 500	89.5	
高负荷	入口	10 549	8 265.6	99.20
	出口	11 168	64	

表 3　烟囱出口烟尘测试数据

Table 3　Dust test data of online monitoring port

项目	采样点	标干风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	烟尘含量/($mg \cdot m^{-3}$)	除尘效率/%
低负荷	入口	8 370	186.5	91.80
	出口	8 570	15.3	
中负荷	入口	8 802	67.2	92.86
	出口	9 454	4.8	
	入口	10 100	89.5	82.20
	出口	10 500	15.8	
高负荷	入口	10 549	64.0	82.70
	出口	11 168	5.8	

流量 8 802 Nm^3/h 工况为例,“一体塔”进口烟气 SO_2 含量为 376 mg/m^3,经粉煤灰溶液脱硫后含量为 12.3 mg/m^3,脱硫效率达 96.7%; SO_2 排放浓度远低于超低排放要求(<35 mg/m^3),同时发现烟囱出口 SO_2 浓度进一步降低,推测是由湿式电除尘器(WESP)导致。WESP 对 SO_2 的脱除是在气液扩散的基础上耦合了电场力和活性基团的作用,即共存在气液扩散、电子吸附强化传质、氧化吸收 3 种吸收机理[17]。研究表明[18],WESP 在无论在干态还是湿态,臭氧产生量都极低,活性基团对 SO_2 基本无脱除效果,即氧化吸收比例很低,喷淋条件下 WESP 放电对 SO_2 的强脱除作用主要源于 SO_2 吸附电子形成,SO_2^- 强化了气液传质,而在干态条件下由于没有喷淋水的存在,SO_2^- 在静电力的作用下运动到极板上将电子释放后,重新回到烟气中,综合来看,WESP 对 SO_2 的脱除效果强弱顺序为:气液扩散>电子吸附强化传质>氧化吸收。

3.4　新型脱硫除尘一体化系统经济性分析

不同脱硫工艺的成本对比见表 6,可知新型脱硫除尘一体化系统由于不使用任何传统脱硫剂,成本较低,本文系统可以直接省却前端布袋除尘器,降低了除尘系统的建设和运行维护成本,进一步降低锅炉出口烟温,提高锅炉热效率,具有良好经济性。

表 4　除尘脱硫塔 SO_2 测试数据

Table 4　SO_2 test data of dust removal and desulfurization tower

项目	采样点	标干风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	SO_2 含量/($mg \cdot m^{-3}$)	脱硫效率/%
低负荷	入口	8 000	328.0	100
	出口	8 370	0	
中负荷	入口	8 802	376.0	96.7
	出口	9 454	12.3	
	入口	10 100	348.0	100
	出口	10 500	0	
高负荷	入口	10 549	327.0	100
	出口	11 168	0	

表 5　烟囱出口 SO_2 测试数据

Table 5　SO_2 test data of online monitoring port

采样点	工况风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	标干风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	含湿量/%	SO_2 含量/($mg \cdot m^{-3}$)		折算氧量/%
				实测值	折算值	
烟囱	17 371	15 622	2.1	6.54	10.9	13.8

表 6　不同脱硫工艺成本对比

Table 6　Cost comparison of different desulfurization processes

项目	脱硫工艺		
	钠碱法	石灰石膏法	粉煤灰法
液气比/($L \cdot Nm^{-3}$)	5	15	2.2
钙钠(硫)比/($mol \cdot mol^{-1}$)	1	1.03	1.03
系统循环水量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	183	570	80
系统耗电量/($kWh \cdot h^{-1}$)	58	109	80
脱硫剂消耗量/($kg \cdot h^{-1}$)	30%浓度液碱:102	80%石灰粉(CaO):55	无消耗脱硫剂
系统水耗量/($t \cdot h^{-1}$)	2	1.1	0.1(主要消耗蒸汽锅炉排污水)
按 8 000 h 计算运行费用/(万元·a^{-1})	119.68	99.44	64.40

4　结　论

1) 改变传统粉煤灰脱硫仅作为脱硫剂载体直接喷入烟道的利用方式,通过提纯粉煤灰中 Ca^{2+} 离子制成碱性浆液实现粉煤灰湿法脱硫;新型脱硫系统完全利用锅炉产生的粉煤灰即可实现 SO_x 超低排放,不需使用其他脱硫剂;同时省却前端布袋除尘器,回收烟气余热,提高锅炉效率,降低运行成本。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2) 新型脱硫系统不设喷头装置，脱硫液直接进入除尘脱硫塔，通过“飓风旋流器”使烟气切割脱硫剂，形成乳化层达到增大反应面、延长反应时间的目的，解决了石灰石湿法脱硫喷头装置易堵塞问题。

3) 中负荷、入口标杆烟气流量8 802 Nm^3/h工况下经新型脱硫系统脱硫后 SO_2含量为 12.3 mg/m^3，脱硫效率 96.7%，除尘后烟尘浓度 67.2 mg/m^3，除尘效率为 98.94%。再经湿式静电除尘(雾)器深度除尘后烟尘浓度为 4.8 mg/m^3，达到超低排放标准。

参考文献(References)：

[1] 汤斐. 浅析我国煤炭清洁高效利用的必要性和可行性[J]. 现代商业，2011(12)：51-52.
TANG Fei. Necessity andfeasibility of clean and efficient utilization of coal in China [J].Modern Business，2011(12)：51-52.

[2] 王翰锋. 中国燃煤工业锅炉政策解析与展望[J]. 洁净煤技术，2020，26(2)：1-6.
WANG Hanfeng. Analysis and prospect of China´s coal industrial boiler policy [J]. Clean Coal Technology，2020，26(2)：1-6.

[3] 项建锋. 钙法脱硫与镁法脱硫的比较[J]. 上海节能，2012(11)：16-20.
XIANG Jianfeng.Comparison of calcium desulfurization and magnesium desulfurization [J]. Shanghai Energy Conservation，2012(11)：16-20.

[4] 陈福仲. 高倍率灰钙循环脱硫过程及影响因素研究[J]. 洁净煤技术，2020，26(2)：130-136.
CHEN Fuzhong. Study on cyclic desulfurization process of high rate calcium ash and its influencing factors [J]. Clean Coal Technology，2020，26(2)：130-136.

[5] 高丛辉.湿法脱硫浆液循环喷淋系统结垢分析及控制措施[J]. 黑龙江电力，2020，42(3)：252-255.
GAO Conghui. Scale analysis and control measures of wet desulphurization slurry circulating spray system [J]. Heilongjiang Electric Power，2020，42(3)：252-255.

[6] 刘高军，蔡向东，李晓辉，等. 浆液中镁离子含量对脱硫反应特性的影响[J]. 动力工程学报，2020，40(12)：1008-1013.
LIU Gaojun，CAI Xiangdong，LI Xiaohui，et al. Effect of magnesium ion content in slurry on desulfurization reaction characteristics [J]. Chinese Journal of Power Engineering，2020，40(12)：1008-1013.

[7] 付颖，钱枫，周芸芸. 粉煤灰在燃煤烟气净化工艺中的应用[J]. 北京工商大学学报(自然科学版)，2006，24(2)：17-19.
FU Ying，QIAN Feng，ZHOU Yunyun.Application of fly ash in the technology of coal fired flue gas treatement [J].Journal of Beijing Technology and Business University(Natural Science Edition)，2006，24(2)：17-19.

[8] 陈明智.利用粉煤灰脱硫技术综述[J].粉煤灰，2002，14(5)：34-36.
CHEN Mingzhi.Review of desulfurization technology using fly ash [J]. Fly Ash，2002，14(5)：34-36.

[9] 朱士芸，黄华荣，茅清希，等. 泡沫除尘器脱硫除尘性能试验研究[J]. 建筑热能通风空调，1999(1)：59-62.
ZHU Shiyun，HUANG Huarong，MAO Qingxi，et al. Experimental study on desulfurization and dust removal performance of foam dust remover [J].Building Thermal Energy，Ventilation and Air Conditioning，1999(1)：59-62.

[10] 朱杰，许月阳，姜岸，等. 超低排放下不同湿法脱硫协同控制颗粒物性能测试与研究[J]. 中国电力，2017，50(1)：168-172.
ZHU Jie，XU Yueyang，JIANG An，et al. Study on the performance of controlling particulate matter by different wet desulfurization under ultra-low emission [J].China Electric Power，2017，50(1)：168-172.

[11] 魏宏鸽，叶伟平，柴磊，等湿法脱硫系统除尘效果分析与提效措施[J]. 中国电力，2015，48(8)：33-36.
WEI Hongge，YE Weiping，CHAI Lei，et al. Analysis of dust removal effect and improvement measures of wet desulfurization system [J].China Electric Power，2015，48(8)：33-36.

[12] 郝强，陈健. 石灰石/石膏湿法烟气脱硫装置的除尘性能[J]. 电力环境保护，2005，21(2)：33-34.
HAO Qiang，CHEN Jian. Dust removal performance of lime/gypsum wet flue gas desulfurization unit [J]. Electric Power Environmental Protection，2005，21(2)：33-34.

[13] 张榕杰，黄世峰，韩枝宏，等. 一种煤粉燃烧中提纯粉煤灰生产脱硫剂工艺：CN103084057A [P].2013-05-08.
ZHANG Rongjie，HUANG Shifeng，HAN Zhihong，et al. A process for producing desulfurizer by purifying fly ash during pulverized coal combustion：CN103084057A [P].2013-05-08.

[14] 张永恒，陈燕萍，庄国防，等. 一种高效除尘脱硫一体化净化塔：CN208287799U [P].2018-12-28.
ZHANG Yongheng，CHEN Yanping，ZHUANG Dafu，et al. An integrated purification tower for high-efficiency dust removal and desulfurization：CN208287799U [P]. 2018-12-28.

[15] 赵汶，陈武. 石灰石-石膏湿法脱硫过程中浆液液滴及细颗粒物迁移转化特性研究[J]. 动力工程学报，2019，39(3)：242-247.
ZHAO Wen，CHEN Wu. Study on migration and transformation characteristics of slurry droplets and fine particles in limestone-gypsum wet desulfurization process [J]. Chinese Journal of Power Engineering，2019，39(3)：242-247.

[16] 张永恒，庄国防，陈燕萍，等. 一种新型燃煤锅炉高效除尘脱硫系统：CN208287777U [P].2018-12-28.
ZHANG Yongheng，ZHUANG Guofang，CHENYanping，et al. A new type of high-efficiency dust removal and desulfurization system for coal-fired boilers：CN208287777U [P].2018-12-28.

[17] LI J，LEI F. Modeling of corona discharge combined with Mn catalysis for the removal of SO from simulated flue gas. [J]. Chemosphere，2013，91(9)：1374-1379.

[18] 杨正大，常倩云，岳涛，等. 湿式静电协同脱除 SO_2、PM 试验研究[J]. 工程热物理学报，2015，36(6)：1365-1370.
YANG Zhengda，CHANG Qianyun，YUE Tao，et al. Experimentalstudy on the synergistic removal of SO_2 and PM by wet static electricity [J]. Journal of Engineering Thermophysics，2015，36(6)：1365-1370.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net