

1 000 MW 超超临界机组超低排放改造工程分析

周 朝 阳

(武汉大学 动力与机械工程学院,湖北 武汉 430072)

摘 要:目前国内众多燃煤火力发电厂已经或正在进行多种污染物超低排放改造工程,进一步降低SO₂、NO_x和烟尘等污染物排放以减轻对严重雾霾天气的影响。在分析某电厂1 000 MW超超临界机组SCR烟气脱硝、湿法烟气脱硫以及静电除尘器运行现状的基础上,提出并实施了采用“SCR脱硝增容+低低温静电除尘器+高频电源静电除尘器改造+脱硫吸收塔提效与协同除尘”的超低排放技术改造方案。对该机组超低排放改造前后烟气脱硫、脱硝、除尘系统进行了性能试验,结果表明烟囱入口烟尘、SO₂、NO_x质量浓度分别为4.0、21.5和38.2 mg/m³,达到了烟尘、SO₂、NO_x的排放浓度分别控制在5、35、50 mg/m³以内的超低排放要求。改造后,在现有烟气脱硫、脱硝、静电除尘装置的基础上每年可减少烟尘排放量543 t、SO₂排放量2 633 t、NO_x排放量634 t,改善了重点区域空气质量。

关键词:超超临界;超低排放;燃煤电厂;湿法烟气脱硫;SCR烟气脱硝;低低温静电除尘器

中图分类号:X773 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2017)06-0118-06

Analysis on the retrofitting engineering of ultra-low pollutant emissions for a 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired power plant

ZHOU Chaoyang

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The retrofitting engineering of ultra-low pollutant emissions in coal-fired power plants in China has been carried out to further reduce SO₂, NO_x and dust emissions to alleviate their effects on serious fog and haze weather. The state of the art on the Selective Catalytic Reduction (SCR) flue gas denitrification, wet flue gas desulfurization (WFGD) and dry electrostatic precipitator (ESP) in a 1 000 MW ultra super critical coal fired power plant was firstly analyzed, and a retrofitting solution of ultra-low pollutant emissions was proposed and carried out with the integrated combination of the increasing capacity of SCR, low-low temperature electrostatic precipitator with high frequency power source, the improving efficiency of wet flue gas desulfurization and the synergistic dedust of the desulfurization absorption tower. The performance tests of the unit were carried out to measure the removal efficiencies of the SCR, WFGD and low-low temperature EPS before and after the retrofitting engineering of ultra-low pollutant emissions. The results show the concentrations of the dust, SO₂ and NO_x at the inlet of the chimney are 4.0 mg/m³, 21.5 mg/m³ and 38.2 mg/m³, respectively, which are lower than the standards of ultra-low pollutant emissions. The amounts of the dust, SO₂ and NO_x emissions are further reduced by 543 tons, 2 633 tons and 634 tons every year after the engineering retrofitting and it significantly improves the local air quality.

Key words: ultra-supercritical; ultra-low pollutant emissions; coal-fired power plant; wet flue gas desulfurization; SCR flue gas denitrification; low-low temperature electrostatic precipitator

0 引 言

煤炭是我国的主要一次能源,煤燃烧过程中产

生的SO₂、NO_x和烟尘是我国大气的主要污染物。近年来我国频繁发生了大面积的严重雾霾天气,给工农业生产和人民的身体健康带来严重的影响,燃

收稿日期:2017-07-07;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.06.022

基金项目:华能国际电力股份有限公司科技资助项目(HNKJ17-G07)

作者简介:周朝阳(1972—),男,河南郑州人,高级工程师,博士研究生,研究方向为火力发电厂锅炉燃烧、节能减排技术与管理。E-mail:zhouzhaoyang@126.com

引用格式:周朝阳.1 000 MW超超临界机组超低排放改造工程分析[J].洁净煤技术,2017,23(6):118-123.

ZHOU Chaoyang. Analysis on the retrofitting engineering of ultra-low pollutant emissions for a 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired power plant[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6):118-123.

煤污染物控制形势日趋严峻。为此,2011年我国颁布了严格的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)^[1],将燃煤火力发电厂烟尘、SO₂、NO_x等污染物排放浓度限值分别降至30、100、100 mg/m³,重点地区降至20、50、100 mg/m³。2014年《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》对燃煤烟气中烟尘、SO₂、NO_x的排放浓度提出了要求新建燃煤机组大气污染物排放基本达到燃气轮机机组排放限值,即在基准氧含量6%的条件下,烟尘、SO₂、NO_x的排放浓度分别不高于10、35、50 mg/m³^[2]。目前国内外对燃煤电厂烟气多种污染物超低排放与协同脱除开展了大量的研究与工程应用,欧美日等发达国家部分电厂已率先实现了燃煤烟气主要污染物排放浓度达到超低排放的要求。日本碧南电厂1 000 MW机组采用低NO_x燃烧器和空气分级燃烧技术、SCR烟气脱硝、低低温静电除尘器、湿法烟气脱硫和湿式静电除尘器实现了烟尘、SO₂、NO_x排放浓度分别为3、30和25 mg/m³^[3]。2014年5月浙江能源集团嘉兴电厂1 000 MW机组率先实施超低排放改造并投入运行,测试结果表明主要污染物烟尘、SO₂、NO_x排放浓度分别达到了2.12、17.47和38.94 mg/m³^[4]。目前我国各发电集团相继实施了燃煤发电机组的超低排放技术改造,并制定了明确时间表,开启了我国燃煤火力发电机组超低排放改造的新局面。本文针对国内某1 000 MW燃烧发电机组主要污染物的排放现状,分析了燃煤机组主要污染物超低排放的技术路线,实施了切实可行的超低排放技术改造,进行了超低排放改造前后烟气脱硫、脱硝和除尘性能测试,烟气主要污染物烟尘、SO₂、NO_x排放浓度分别低于5、35、50 mg/m³,有效改善了重点区域空气质量。

1 1 000 MW 燃煤机组污染物排放现状

某电厂2台1 000 MW机组锅炉为东方锅炉厂制造的超超临界一次中间再热直流锅炉,为超超临界参数变压直流炉、对冲燃烧方式、固态排渣、单炉膛、一次再热、全悬吊π型结构。采用东方锅炉厂引进技术生产的旋流燃烧器前后墙对冲燃烧,燃用晋南、晋东南地区贫煤、烟煤的混合煤种。燃烧系统采用空气分级燃烧和浓淡燃烧等技术,可有效降低NO_x排放量和降低锅炉最低稳燃负荷。

烟气脱硫装置为一炉一塔配置的喷淋塔,采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺,吸收塔配置4层

喷淋层和4台浆液循环泵。在燃用收到基含硫量为1.8%的设计煤种时(对应的脱硫塔入口SO₂质量浓度为3 900 mg/m³)设计脱硫效率不小于95%,脱硫塔出口SO₂排放浓度在195 mg/m³左右。选择性催化还原烟气脱硝(SCR)装置催化剂层数按“2+1”模式布置,初装2层预留1层。目前投运2层催化剂,SCR脱硝装置可有效地控制NO_x排放浓度在80 mg/m³。锅炉尾部配备2台3室4电场的干式静电除尘器,对原有除尘器进行了高频电源改造后,除尘器出口烟尘质量浓度可达到39.8 mg/m³。

从以上数据可以看出,虽然该机组依据2011年的排放标准进行了增容提效改造,但现有的烟气脱硫、脱硝、除尘装置不能满足超低排放NO_x、SO₂、烟尘排放分别低于50、35、5 mg/m³。因此,该机组于2016年底实施了超低排放技术改造。

2 1 000 MW 燃煤机组超低排放改造工程

环保岛超低排放技术是对目前燃煤电站的污染物控制技术的整合,在实现超低排放目标的同时有机协调各部分污染物减排装置,以达到NO_x、SO₂和烟尘等污染物的协同脱除。其中低低温静电除尘器和湿式静电除尘器以其高效的除尘性能及污染物联合脱除性能,逐渐成为多种污染物协同脱除技术的核心。

2.1 烟气脱硫系统改造

该电厂2台1 000 MW机组脱硫装置自2012年投运以来,净烟气SO₂浓度满足小于200 mg/m³排放限值环保要求,但无法满足《火电厂大气污染物排放标准》中关于重点地区不超过50 mg/m³的SO₂排放限值,更无法满足超低排放SO₂浓度不超过35 mg/m³的要求。为了满足新的超低排放要求,需要对1 000 MW燃煤机组脱硫装置进行增容提效改造。根据电厂近年来实际燃用煤种硫含量,结合当前石灰石-石膏湿法单塔脱硫装置提效改造的技术水平及改造后要达到的出口SO₂质量浓度不超过35 mg/m³的控制目标,本次脱硫提效改造设计煤种收到基含硫量(S_{ar})按1.5%考虑,即原烟气中SO₂浓度按3 350 mg/m³(标态,干基,6% O₂,下同)考虑,要求脱硫系统效率≥99%。

本次改造喷淋吸收塔新增1层喷淋层和1层合金托盘,改造后按5层喷淋层(其中4层投运1层备用)加1层合金托盘设置。原吸收塔入口烟道上沿

至底层喷淋层之间距离为3 m,利用此空间增设1层不锈钢材质、3 mm厚度的合金托盘。改造原有的4层喷淋层,并在原顶层喷淋层上方新增1层喷淋层,喷淋层间距为2 m,新增喷淋层对应设置一台浆液循环泵,改造喷淋层及新增喷淋层对应循环泵流量均为14 000 m³/h。为保证可靠的脱硫效率,本次改造增加了喷淋层喷嘴数目,提高喷淋层覆盖率,单层喷淋覆盖率不小于300%,并采用单向双头高效喷嘴。为防止吸收塔边壁烟气逃逸,每2层喷淋层之间设置塔壁聚气环。考虑吸收塔协同除尘效果,拆除原有两级屋脊式除雾器,新增塔内三级高效屋脊式除雾器和一级烟道除雾器,并增加相应的冲洗管路,烟道除雾器冲洗水按返回吸收塔设计。脱硫后的烟气夹带的液滴在吸收塔出口的除雾器中收集,使净烟气的液滴含量不超过15 mg/m³。

2.2 SCR烟气脱硝系统改造

烟气脱硝装置采用选择性催化还原烟气脱硝(SCR)技术,催化剂层数按“2+1”模式布置,脱硝还原剂用液氨,SCR脱硝装置设计入口NO_x质量浓度为550 mg/m³。在设计煤种及校核煤种、锅炉最大连续出力工况(BMCR)、氨逃逸浓度不大于3 μL/L情况下,初装的2层催化剂时SCR最大脱硝效率为83.3%。

此次SCR烟气脱硝改造方案为增加1层备用层催化剂并更换1层催化剂,改造后原入口NO_x浓度不变,脱硝反应器出口NO_x质量浓度要求降低到50 mg/m³以内,其脱硝效率≥90.9%。改造后性能试验时脱硝效率不低于92.8%,NO_x排放浓度为38.2 mg/m³。综合以上SCR装置性能评估,在现有SCR烟气脱硝基础上按照“2+1”模式增加1层备用层催化剂并更换1层催化剂,进一步提高了SCR脱硝效率,实现了低于50 mg/m³的NO_x超低排放控制目标。

2.3 烟尘超低排放改造

目前国内外燃煤电厂多采用静电除尘器、电袋复合除尘器等除尘技术,湿式脱硫吸收塔具有协同脱除烟尘的效果。为了进一步大幅度降低燃煤电厂烟尘排放浓度,目前主要采用低低温静电除尘器、湿式静电除尘器或其组合技术^[5]。

2.3.1 低低温静电除尘器

低低温省煤器布置在空气预热器与静电除尘器之间,对锅炉排烟进行余热回收利用,烟气温度从通常的130~140℃降到90℃左右,回收的烟气余热

用于加热锅炉给水或加热燃烧所需的空气以进一步提高机组的效率和降低供电煤耗。烟气温度对静电除尘器灰比电阻和除尘效率的影响参见文献[6]。当进入静电除尘器的烟气温度从通常的130~140℃降低至90~100℃时,飞灰比电阻降低了1个数量级以上,而且对于不同的煤种其飞灰比电阻降低幅度有所不同。飞灰比电阻的降低可以避免反电晕现象,大幅度提高静电除尘器除尘效率。但飞灰比电阻的降低会加剧二次扬尘现象的产生,这需要采取针对性措施,才能保证烟尘排放浓度低于常规静电除尘器^[7]。

寿春晖等^[8]研究了某百万千瓦机组进行颗粒物脱除特性,结果表明采用低低温静电除尘器后,对粒径>10 μm的烟尘的脱除效率高达99%。与此同时,烟气温度降低促进了烟气中SO₃与水蒸气结合生成硫酸雾,易被飞灰颗粒吸附,吸附了SO₃的烟尘颗粒进入静电除尘器后,被静电除尘器捕集排出,不仅解决了下游设备的防腐蚀难题,还提高了后续脱硫吸收塔的脱硫效率,降低了脱硫耗水量^[9]。烟气温度降低减小了烟气体积,降低引风机的电耗,但加装低低温省煤器会增加烟气阻力损失。另外,除尘后的低温烟气能达到湿法脱硫工艺的烟温要求,不必再加装GGH换热器来降低烟温。

2.3.2 湿法烟气脱硫协同除尘

近年来,众多学者在研究湿法烟气脱硫吸收塔高效脱硫的基础上,研究了其除尘性能的协同作用。脱硫吸收塔除尘主要包括了脱硫吸收区除尘和除雾器区除尘。烟气进入脱硫吸收塔后,烟尘与雾化后的液滴之间相互碰撞,经集聚和沉降作用被石灰石浆液液滴捕捉。被液滴捕捉的一部分烟尘在重力作用下从吸收区落入到浆液池中,达到了捕捉烟尘的效果。另一部分细小液滴在除雾器的弯曲通道内凝聚,当自身重力大于烟气升力和液体表面张力时,烟尘从除雾器上落入到浆液池中,实现液滴回收和脱除烟尘的目的。王翱等^[10]、王琿等^[11]对脱硫吸收塔内细颗粒物的捕集性能进行了试验研究和数值模拟,结果表明湿式脱硫吸收塔对于2.5 μm以上的颗粒物具有较高的脱除性能,可达到74.5%的脱除效率。因此,湿法脱硫吸收塔协同除尘可进一步降低烟尘排放浓度。

2.3.3 湿式静电除尘器

近30年来,湿式静电除尘器(WESP)在欧美和日本等发达国家已取得较好的成效。日本三菱重工

在碧南电厂采用 WESP 技术投产近 20 年来,烟尘排放浓度控制在 $2 \sim 5 \text{ mg/m}^3$ ^[12]。WESP 在国内电厂应用处于起步阶段,随着国家对烟尘排放指标要求越来越严格,WESP 将成为控制细小颗粒物的重要手段。湿式静电除尘器的工作原理为在干式静电除尘器的基础上安装连续水膜和喷淋装置,烟气中粉尘在电极作用下,电子和正离子附着在粉尘表面,促使粉尘在集尘极表面富集,被连续水膜冲走,达到高效除尘的效果,尤其对 PM_{2.5} 和硫酸烟雾具有较高脱除作用。湿式静电除尘器的使用,不仅可以满足烟尘超低排放的要求,同时能够减轻石膏雨和蓝色烟雾等污染^[13]。

熊桂龙等^[14]研究了 WESP 的脱除机理和对细小颗粒物的分级脱除效率,结果表明 WESP 对亚微米级的细小颗粒具有较高的脱除效率。赵磊等^[15]对几种不同极板的湿式静电除尘器性能进行比较,认为线板式湿式静电除尘器对大于 $10 \mu\text{m}$ 和小于 $1 \mu\text{m}$ 的烟尘有更好的除尘效果。采用 DPI 细颗粒物采样仪对某 300 MW 燃煤机组采用湿式静电除尘器前后进行采样测试,烟气中颗粒物浓度由 16.1 mg/m^3 降低至 1.8 mg/m^3 ,脱除效率达 88%。Sui 等^[16]采用 ELPI+取样分析系统测量了三河电厂 300 MW 超低排放机组低低温静电除尘器、烟气脱硫吸收塔以及湿式静电除尘器进出口的细颗粒物排放浓度和粒径分布,结果表明采用低低温静电除尘器、提高湿法烟气脱硫的洗涤效果和改进除雾器性能等措施后烟尘浓度可达到超低排放标准,进一步采用湿式静电除尘器烟气中细颗粒物排放浓度低于 1 mg/m^3 。

2.4 超低排放改造工程实施方案

基于此次超低排放改造工程目标要求,结合机组实际运行条件和脱硫装置结构,该机组超低排放改造采用“SCR 脱硝增容+低低温静电除尘器+高频静电除尘器改造+脱硫吸收塔提效与协同除尘”的技术方案,如图 1 所示。采用低低温省煤器回收利用烟气余热加热锅炉给水,提高机组效率和降低供电煤耗。

采用低低温省煤器将锅炉排烟温度从 $139 \text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $94 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,提高了低低温静电除尘器除尘效率。在原静电除尘器前加装一个高频电源的电场,并对原电场进行高频电源改造,静电除尘器原第 4 电场的高频电源移至第 3 电场,第 1、4 电场的电源采用进口高频电源。同时完善了低低温静电除尘器

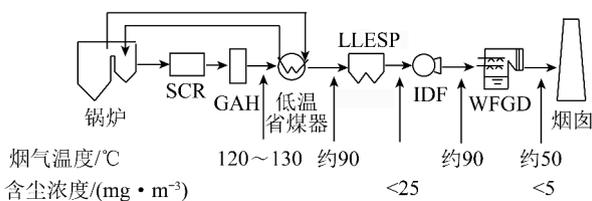


图 1 1 000 MW 燃煤机组超低排放改造工程方案

Fig. 1 Retrofitting solution of ultra-low pollutant emissions for a 1 000 MW coal-fired unit

配套设施,在静电除尘器绝缘子位置加装了强制热风吹扫装置,电场所有灰斗采用蒸汽加热改造。检查更换 1,2,3 电场内部损坏的极板,更换内部损坏的极线、极板,电场内部气流分布装置、漏风、振打等检查、修复与调整,改造各电场输灰系统。

在现有 SCR 烟气脱硝基础上按照“2+1”模式增加 1 层备用层催化剂并更换 1 层催化剂,进一步提高 SCR 脱硝效率,实现了低于 50 mg/m^3 的 NO_x 超低排放控制目标。本次改造喷淋吸收塔新增 1 层喷淋层及 1 层合金托盘,即改造后脱硫吸收塔设置了 1 层喷淋层(其中 4 层投运、1 层备用)和 1 层合金托盘。脱硫改造中增装了 1 层合金托盘,大部分细小烟尘经过托盘的筛孔进入泡沫层,受泡沫扰动的影响而改变方向,从而增加了与液体接触的机理,达到除尘净化效果。同时将塔内原两级除雾器拆除,新增了三级高效屋脊式除雾器和一级烟道除雾器,能够有效提高脱硫塔对烟尘的脱除效果。通过采用静电除尘器高频电源改造、低低温静电除尘器以及湿式脱硫吸收塔协同除尘和高效多级除雾器等组合措施,脱硫塔出口烟尘浓度可降低到 5 mg/m^3 以下,并预留了湿式静电除尘器的安装空间。当燃用高灰量的煤种以及烟尘排放浓度限值更加严格时,可在脱硫吸收塔后安装湿式静电除尘器。

3 燃煤机组超低排放改造工程效果

3.1 超低排放改造工程性能试验结果

通过对该电厂 1 000 MW 机组烟气脱硫、脱硝、除尘装置进行了性能考核试验,主要测试结论如下:

1) 机组负荷 986.6 MW,实测脱硫装置出口烟气流量为 $342.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,脱硫装置入口烟气温度为 $98.4 \text{ }^\circ\text{C}$,脱硫装置出口烟气温度为 $49.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) 脱硫装置入口原烟气 SO_2 质量浓度 2301.1 mg/m^3 ,脱硫装置出口净烟气 SO_2 质量浓度 21.5 mg/m^3 , SO_2 脱除效率 99.04%。脱硫装置出口净烟气 SO_2 质量浓度 $\leq 35 \text{ mg/m}^3$,脱硫装

置SO₂脱除效率及净烟气SO₂排放浓度均满足设计值要求。

3) SCR反应器入口NO_x平均质量浓度为549.4 mg/m³,反应器出口NO_x平均质量浓度为38.2 mg/m³,低于50 mg/m³的设计值,脱硝效率为93.1%。

4)测得各个不同位置烟尘浓度如图2所示,低低温静电除尘器入口烟尘质量浓度24.33 g/m³,脱硫吸收塔入口烟尘质量浓度23.0 mg/m³,低低温静电除尘器除尘效率99.91%。脱硫吸收塔出口净烟气粉尘质量浓度的实测平均值为4.8 mg/m³,烟囱入口净烟气粉尘质量浓度的实测平均值为4.0 mg/m³。吸收塔出口、烟囱入口粉尘质量浓度均≤5 mg/m³,满足设计要求。

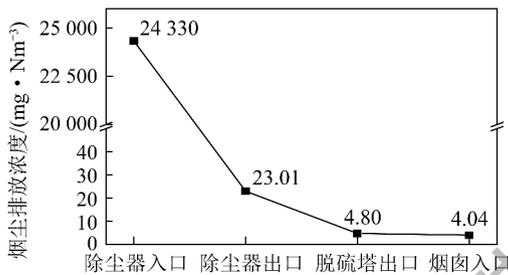


图2 工程改造后不同位置烟尘浓度

Fig. 2 Dust concentrations at different positions after the engineering retrofitting

该1 000 MW超低排放改造后,烟囱入口烟尘、SO₂、NO_x质量浓度分别为4.0、21.5和38.2 mg/m³,均达到燃煤机组/各污染物超低排放的要求。

3.2 超低排放改造经济社会与环保效益分析

采用上述“SCR脱硝增容+低低温静电除尘器+高频静电除尘器改造+脱硫吸收塔提效与协同除尘”的超低排放技术方案对某1 000 MW燃煤机组进行技术改造后,烟囱入口烟尘、SO₂、NO_x质量浓度分别为4.0、21.5和38.2 mg/m³,达到了排烟中烟尘、SO₂、NO_x的排放浓度分别控制在5、35、50 mg/m³以内的超低排放要求。与超低排放改造前该燃煤机组各污染物排放浓度相比,改造后烟尘、SO₂、NO_x排放浓度分别降低了35.8、173.5和58.5 mg/m³。按该机组烟气量为3 372 811 m³/h和年运行4 500 h计算,在现有烟气脱硫、脱硝、除尘装置基础上每年可进一步减少烟尘排放量543 t、SO₂排放量2 633 t、NO_x排放量634 t,满足燃煤机组大气污染物超低排放限值的要求,并明显改

善当地空气质量。

4 结 论

1)根据国家节能减排的要求,低低温静电除尘器和湿式静电除尘器凭借其高效的除尘性能和广泛的适用性逐渐成为燃煤发电机组实现超低排放的有效途径。

2)采用“SCR脱硝增容+低低温静电除尘器+高频静电除尘器改造+脱硫吸收塔提效与协同除尘”的超低排放技术方案对某1 000 MW燃煤机组进行技术改造后,烟囱入口烟尘、SO₂、NO_x质量浓度分别为4.0、21.5和38.2 mg/m³,达到了排烟中烟尘、SO₂、NO_x的排放浓度分别控制在5、35、50 mg/m³以内的超低排放要求。

3)实施上述超低排放改造后,1 000 MW燃煤机组在现有烟气脱硫、脱硝、除尘装置的基础上每年可进一步减少烟尘排放量543 t、SO₂排放量2 633 t、NO_x排放量634 t,改善了重点区域空气质量。

参考文献 (References):

- [1] GB 13223—2011,火电厂大气污染物排放标准[S].
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》的通知[EB/OL].(2014-09-12)[2017-07-07].http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201409/t20140919_626240.html
- [3] 张军,郑成航,张涌新,等.某1 000 MW燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J].中国电机工程学报,2016,36(5):1310-1314.
ZHANG Jun,ZHENG Chenghang,ZHANG Yongxin,et al. Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a 1 000 MW coal-fired power plant[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(5): 1310-1314.
- [4] 郑婷婷,周月桂,金圻焯.燃煤电厂多种烟气污染物协同脱除超低排放分析[J].热力发电,2017,46(4):10-14.
ZHENG Tingting,ZHOU Yuegui,JIN Qiye. Integrated removal and ultra-low emissions of multiple pollutants for coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4): 10-14.
- [5] 史文峥,杨萌萌,张绪辉,等.燃煤电厂超低排放技术路线与协同脱除[J].中国电机工程学报,2016,36(16):4308-4318.
SHI Wenzheng,YANG Mengmeng,ZHANG Xuhui,et al. Ultra-low emission technical route of coal-fired power plants and the cooperative removal[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(16): 4308-4318.
- [6] YOSHIO Nakayama,SATOSHI Nakamura,YASUHIRO Takeuchi, et al. MHI high efficiency system-proven technology for multi pollutant removal[R]. Hiroshima Research & Development Center,

- 2011;1-11.
- [7] 酆建国,酆祝海,何毓忠,等. 低低温电除尘技术的研究及应用[J]. 中国环保产业,2014(3):28-34.
LI Jianguo, LI Zhuhai, HE Yuzhong, et al. Research and application on electric precipitation technology with low-low temperature [J]. China Environmental Protection Industry, 2014(3):28-34.
- [8] 寿春晖,祁志福,谢尉扬,等. 低低温电除尘器颗粒物脱除特性的工程应用试验研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(16):4326-4332.
SHOU Chunhui, QI Zhifu, XIE Weiyang, et al. Experimental study on engineering application of particulate matter removal characteristics of low-low temperature electrostatic precipitator [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(16):4326-4332.
- [9] 胡斌,刘勇,任飞,等. 低低温电除尘协同脱除细颗粒与 SO₃ 实验研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(16):4319-4325.
HU Bin, LIU Yong, REN Fei, et al. Experimental study on simultaneous control of fine particle and SO₃ by low-low temperature electrostatic precipitator [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(16):4319-4325.
- [10] 王翱,宋蕾,姚强. 脱硫塔内单液滴捕集颗粒物的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2014,35(9):1889-1893.
WANG Ao, SONG Qiang, YAO Qiang. Numerical simulation of single droplet capturing particles in the WFGD [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(9):1889-1893.
- [11] 王琿,宋蕾,姚强,等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(5):1-7.
WANG Hui, SONG Qiang, YAO Qiang, et al. Experimental study on removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles from a coal-fired power plant [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(5):1-7.
- [12] 张华东,周宇翔,龙辉. 湿式电除尘器在燃煤电厂的应用条件分析[J]. 中国电力,2015(8):13-16.
ZHANG Huadong, ZHOU Yuxiang, LONG Hui. Study on application conditions of wet electrostatic precipitators in coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2015(8):13-16.
- [13] 展茂源,王猛,邓徐帆,等. 湿式静电除尘器在燃煤电厂超低排放工程中的应用[J]. 电力科技与环保,2017,33(2):30-33.
ZHAN Maoyuan, WANG Meng, DENG Xuzhen, et al. Engineering application of wet electrostatic precipitator in ultra-low emission control technology in coal-fired power plant [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2017, 33(2):30-33.
- [14] 熊桂龙,李水清,陈晟,等. 增强 PM_{2.5} 脱除的新型电除尘技术的发展[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2217-2223.
XIONG Guilong, LI Shuiqing, CHEN Sheng, et al. Development of advanced electrostatic precipitation technologies for reducing PM_{2.5} emissions from coal-fired power plants [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(9):2217-2223.
- [15] 赵磊,周洪光. 超低排放燃煤火电机湿式电除尘器细颗粒物脱除分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(2):468-473.
ZHAO Lei, ZHOU Hongguang. Particle removal efficiency analysis of WESP in an ultra low emission coal-fired power plant [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(2):468-473.
- [16] SUI Zifeng, ZHANG Yongsheng, PENG Yue, et al. Fine particulate matter emission and size distribution characteristics in an ultra-low emission power plant [J]. Fuel, 2016, 185:863-871.