

燃煤电站烟气污染物深度脱除技术的分析

张晓鲁

(中国电力投资集团公司,北京 100033)

[摘要] 近年来雾霾天气的频繁出现使得细颗粒物($PM_{2.5}$)成为了公众关注的热点, $PM_{2.5}$ 的控制也已增加到2012年发布的《环境空气质量标准》中,而目前我国现有的烟气污染物控制技术难以脱除 $PM_{2.5}$,因此,为深度脱除 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 SO_3 以及重金属等烟气污染物,开发燃煤电站烟气污染物深度脱除技术(深度脱除技术)成为亟待解决的问题。本文系统分析了开发适用于我国燃煤电站的深度脱除技术的必要性以及存在的问题,重点分析研究了 $PM_{2.5}$ 脱除技术、全负荷下超超临界锅炉的低 NO_x 排放以及SCR工作温度的适应性。最后,以某电厂 2×660 MW超超临界机组为例,介绍了烟气污染物深度脱除系统方案,以此为基础,分析提出了1 000 MW超超临界机组烟气污染物深度脱除的技术路线。

[关键词] 燃煤机组;烟气污染物;深度脱除; $PM_{2.5}$ 脱除

[中图分类号] TM611 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)10-0047-05

1 前言

细颗粒物($PM_{2.5}$)是频繁引发、加重雾霾天气的主要成因之一。随着我国社会经济的快速发展,在不断增加的火力发电、冶金、石油、交通、采暖等各种工业活动和人民日常生活行为中,因燃烧化石燃料而排放的烟尘,是 $PM_{2.5}$ 的主要来源,大多含有重金属等有毒物质。

我国一次能源以煤为主,决定了以燃煤发电为主的发电格局,燃煤发电装机容量占总装机容量的75%左右,发电量占总发电量的80%左右,且长期难以改变。提高燃煤发电效率、降低污染物排放是电力科技进步的永恒主题,是我国电力工业和国民经济可持续发展的根本保证。通过关停效率低、污染严重的小火电机组,加快发展大容量、高参数机组,加快研发新型烟气净化技术,用现代化技术改造老机组,加大燃煤电厂环保治理的力度等措施^[1-3],电

力工业的节能减排成效较好。在满足经济高速增长需求的同时,污染物排放总量基本控制在了2000年水平。

根据中电联的统计数据^[4,5],与2000年相比,2013年的烟气脱硫机组容量(不含流化床机组)由 5×10^6 kW快速提升到 7.15×10^8 kW,占全国煤电机组容量的91%,比美国高出30%;烟气脱硝机组容量也达到 4.3×10^8 kW,占全国煤电机组容量的55%,比美国高出5%;所有燃煤电厂全部配置高效除尘设施。全国平均供电煤耗下降了71 g/kW·h,达到321 g/kW·h。主要污染物排放浓度大幅下降,在燃煤发电量比2000年增加3倍多的情况下,全国燃煤发电的 SO_2 排放总量控制在 8.2×10^6 t,比2000年(8.9×10^6 t)略有降低; NO_x 排放总量为 8.34×10^6 t,比2000年(4.69×10^6 t)增加78%;烟尘排放总量为 1.42×10^6 t,大大低于2000年水平(3.21×10^6 t)。但是,这 1.42×10^6 t的烟尘排放就是如今要治理 $PM_{2.5}$

[收稿日期] 2014-07-15

[作者简介] 张晓鲁,1952年出生,女,山东掖县人,教授级高级工程师,主要从事发电工程和科技管理研究工作;E-mail:zx1@cpicorp.com.cn

的攻关目标。

在燃煤发电面临着深度控制 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_3 、 Hg 等重金属排放的新的技术要求下,我国现有的烟气净化技术很难达到这一目标。主要难点在于,常规的电除尘器对于 $\text{PM}_{2.5}$ 不能有效捕集,湿法脱硫吸收塔虽可脱除烟尘中的部分粗颗粒,但却难以去除 $\text{PM}_{2.5}$ 及以下的细颗粒^[6,7]。因此,为解决我国燃煤电站的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染问题,同时进一步控制烟气中 SO_2 、 SO_3 、 Hg 等重金属的排放,开发燃煤机组烟气污染物深度脱除技术是燃煤发电健康发展、助力实现中国梦的战略选择。

深度脱除技术俗称燃煤电站超洁净技术,是对现有的燃煤机组烟气污染物脱除系统进行优化集成,增加湿式电除尘装置^[8],深度脱除 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 SO_3 、重金属等烟气污染物,达到燃气电站的排放标准:粉尘 $5 \sim 10 \text{ mg/Nm}^3$, NO_x 和 $\text{SO}_x < 30 \text{ mg/Nm}^3$, 同时保持较低的系统能耗。

2 开发深度脱除技术存在的关键技术问题

在系统集成原有的烟气净化技术的基础上,开发深度脱除技术的主要技术难点有4个:a. $\text{PM}_{2.5}$ 的脱除问题;b. $\text{PM}_{2.5}$ 脱除与脱硫、脱硝和除尘系统的协同问题;c. 全负荷和变负荷过程中超超临界燃煤锅炉低 NO_x 排放问题;d. 深度脱除技术的参数、设备与系统优化问题。

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 的脱除问题

目前,针对燃煤电厂的 $\text{PM}_{2.5}$ 脱除技术主要有新型电除尘技术(如电凝并技术、旋转电极技术、高频脉冲电源技术等)和电袋复合技术等,这些技术虽对 $\text{PM}_{2.5}$ 脱除具有一定的效果,但仍达不到深度脱除 $\text{PM}_{2.5}$ 的要求。因此,对于我国的燃煤电厂而言,有必要在湿法脱硫后增加专门的 $\text{PM}_{2.5}$ 脱除设备——湿式电除尘器。国内的湿式电除尘器在化工、冶金、建材等行业已开始应用,而燃煤电站所采用的湿式电除尘技术与这些行业相比,存在特殊的要求和技术难题,迫切需要开发适应于我国燃煤电站的 $\text{PM}_{2.5}$ 脱除工艺及其装备。

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 脱除与脱硫、脱硝和除尘系统的协同问题

国外在燃煤电站烟气污染治理技术方面,经过了长期研究和发展,应用的成熟技术主要有:静电除尘、袋式除尘、低低温静电除尘、湿式电除尘、湿法石灰石-石膏脱硫、海水脱硫、选择性催化还原法(SCR)脱硝、选择性非催化还原法(SNCR)脱硝

等。采用上述技术的协同处理,达到烟气污染物深度脱除是国外燃煤电站技术发展的方向。

我国燃煤电站烟气污染治理技术经过多年发展,也取得了长足的进步。当前我国燃煤电站除尘方式以静电除尘为主,袋式除尘也逐步得到应用;脱硫方式以石灰石-石膏湿法脱硫为主,其他方式如海水、干法脱硫也得到一定程度的应用;脱硝方式以低氮燃烧及SCR方式为主。总体上,对于粉尘、 SO_2 、 NO_x 等烟气污染物,我国烟气污染治理技术与国外水平基本相当。

但是,我国各类烟气污染治理技术主要以独立或分散的方式使用,没有系统地研究烟气中多种污染物的传递变化与关联影响。部分设备制造企业为满足当前排放标准,对湿式电除尘器、高效脱硫等净化单元展开了试验研究,还缺乏完整的多污染物深度脱除关键技术研究,尚未形成成熟的大型燃煤机组烟气污染物深度脱除控制技术与应用示范。因此,迫切需要研发适用于我国燃煤电站的 SO_x 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、重金属等烟气污染物深度脱除的协同技术。

2.3 全负荷和变负荷过程中超超临界燃煤锅炉低 NO_x 排放问题

实现全负荷下超超临界机组 NO_x 控制是深度脱除所面临的另一个技术难题。所谓全负荷,即从低负荷到满负荷的全部负荷工况。超超临界燃煤锅炉低负荷运行时($< 50\%$ 最大连续蒸发量(BMCR)),为了保证再热汽温、SCR入口烟温以及低负荷稳燃,往往需要较高的烟气氧浓度(风煤比较大)和较短的停留时间(燃烧器上摆),锅炉在低负荷下 NO_x 排放较高。而简单地调整锅炉布置结构,又难以同时在低负荷和满负荷工况下实现低 NO_x 排放,致使目前锅炉无法满足全负荷下低 NO_x 排放的要求。另外,SCR脱硝技术所需要的工作温度控制在超超临界锅炉中也受到受热面的布置和安全运行的制约。

2.4 烟气污染物深度脱除技术的参数、设备与系统优化问题

国外燃煤电站烟气污染物的治理案例及国内的研究表明,采用烟气污染物深度协同脱除技术使燃煤电站烟气排放达到粉尘(含 $\text{PM}_{2.5}$) 达到 $5 \sim 10 \text{ mg/Nm}^3$ 、 SO_2 和 NO_x 低于 30 mg/Nm^3 是可实现的。现阶段技术推广的主要障碍是:建设投资高、运维成本大、全工况满足排放指标的适应性差、长

期稳定运行的可靠性较低。究其原因主要有:净化设备增多、系统复杂化;各净化单元工艺匹配和协同性不高;部分关键技术与装备的国产化产品不成熟;低负荷工况与变工况下的烟气污染物脱除效率降低等。

3 需攻关的关键技术及技术路线

为同步满足我国 600 MW 级和 1 000 MW 级燃煤发电机组深度脱除烟气污染物的大规模产业需求,研究确定了 2×660 MW 超临界机组的烟气污染物深度脱除系统方案,系统分析了 1 000 MW 级超临界机组烟气污染物深度脱除系统的关键技术和技术路线。

3.1 2×660 MW 超临界机组烟气污染物深度脱除系统方案

某电厂 2×660 MW 超临界机组烟气污染物控制系统采用污染物深度脱除技术,在同步建设烟气脱硫、脱硝装置的同时,为减少 PM_{2.5}、SO₃ 排放和解决石膏雨问题,在脱硫装置出口加装湿式电除尘器(WESP),脱硫后的净烟气经湿式静电吸附进一步收尘处理后,经由烟囱排入大气。工程设计烟囱出口最大烟尘含量为 10 mg/Nm³。

工程设计和校核煤种均为无烟煤,机组的主设备参数如下。

锅炉:超临界参数变压运行直流炉,W 火焰燃烧方式,Π 型布置;最大连续蒸发量(BMCR):2 090 t/h;额定蒸汽参数:25.4 MPa(g)/571 ℃。

汽轮机:超临界参数、单轴、一次中间再热、三缸四排汽、凝汽式汽轮机;额定功率:660 MW;额定进汽流量:1 990.3 t/h;额定初参数:24.2 MPa(g)/566 ℃;额定背压:5.6 kPa(a)。

深度脱除系统设计方案:低氮燃烧+SCR 脱硝+静电除尘(配置高频电源)+双循环湿法脱硫+湿式电除尘。其中湿式电除尘布置在双循环湿法脱硫吸收塔上端,形成一体化装置,整体布局紧凑、合理,系统顺畅,节省占地和投资。该工程采用湿式电除尘技术(WESP),除尘效率不低于 75%,设备年利用小时按 5 000 h 考虑,WESP 装置可用率达 100%,装置服务寿命 30 年。WESP 工艺系统主要由烟气系统、收尘极系统、放电极系统、循环冲洗系统、保护风系统等组成。

工艺系统设计原则包括以下三点。

1) 湿式电除尘装置采用一台炉设置一台湿式

电除尘器,每台风式电除尘器装置的烟气处理能力为一台锅炉 100% BMCR 工况时的烟气体积,并留有适当余量。

2) 出口粉尘浓度 ≤ 10 mg/Nm³, 脱尘效率按不小于 75% 设计。

3) 在设备的冲洗和清扫过程中产生的水流入吸收塔内作为脱硫补给水。

WESP 的布置方案主要有两种:在湿法脱硫吸收塔与烟囱之间单独布置板式 WESP(板式布置),或在湿法脱硫吸收塔上布置管式 WESP(管式布置)。这两种布置方案均为成熟技术,且在国内外均有应用,在技术上是可行的。板式布置因接口烟道和流速等原因,占地面积较大;管式布置利用了脱硫吸收塔本体和出口烟道位置,其占地面积小于板式布置。由于该工程场地狭窄,因此选用高效节能双循环湿法脱硫与管式湿式电除尘一体化技术,该技术可充分减少场地利用,适于新建项目和改造项目,特别适于改造项目。目前已进入施工图设计阶段。

3.2 1 000 MW 级超超临界机组烟气污染物深度脱除技术路线分析

以将要工程示范的 660 MW 超临界烟气污染物深度脱除技术为基础,计划开发 1 000 MW 级超超临界机组烟气污染物深度脱除技术,机组的主要设计指标如下。容量:1 000 MW;机组可用率:90%;厂用电率:3.75%;锅炉效率:94.65%;燃烧效率:99.5%;锅炉出口 NO_x:200 mg/Nm³;烟尘排放指标:4.2 mg/Nm³;SO₂ 排放指标:11.9 mg/Nm³;NO_x 排放指标:30 mg/Nm³(适用范围为 40%~100% 的 BMCR)。

开发适用于我国 1 000 MW 级超超临界机组烟气污染物深度脱除技术,同时建设示范工程,需要解决以下关键技术。

1) 1 000 MW 超超临界锅炉全负荷和变负荷过程中低 NO_x 排放技术。1 000 MW 超超临界锅炉由于锅炉容量大、蒸汽参数高,要求锅炉在全负荷和变负荷下均能满足 NO_x 的排放要求和适应 SCR 脱硝的工作温度要求。需要开发适合锅炉全负荷下低 NO_x 排放的 1 000 MW 超超临界锅炉低氮燃烧器及燃烧系统、1 000 MW 超超临界锅炉受热面布置优化设计技术、1 000 MW 超超临界锅炉变负荷低 NO_x 燃烧控制策略及其控制技术等技术,研制 1 000 MW 超净排放全负荷低 NO_x 锅炉。

2)湿法脱硫与湿式电除尘一体化技术。在常规条件下脱硫效率需要达到99%以上才能实现SO₂深度脱除,现有烟气脱硫技术在低能耗下难以实现。PM_{2.5}脱除应采用电除尘器、湿法脱硫装置和湿式电除尘器组成的一体化烟气净化系统才能同时实现SO₂、SO₃、PM_{2.5}、重金属等烟气污染物的深度脱除以及保持较低能耗。

3)1 000 MW超超临界机组多目标的系统集成优化技术。烟气污染物深度脱除系统是一个由多工艺组成的复杂系统,必须兼顾系统性能、排放指标、系统可靠性、运维成本等进行系统集成与优化。

开发1 000 MW级超超临界机组烟气污染物深度脱除技术,建设示范工程的技术路线是:通过湿法脱硫与湿式电除尘器一体化中试装置开发深度脱除的关键技术,在660 MW超临界机组湿式电除尘与湿法脱硫一体化技术的基础上,开发1 000 MW超超临界湿式电除尘与湿法脱硫一体化技术,研制1 000 MW湿式电除尘与湿法脱硫一体化装置;在现有1 000 MW超超临界锅炉技术的基础上,开发全负荷下满足SCR要求的1 000 MW锅炉低NO_x技术,设计出适合1 000 MW全负荷低NO_x锅炉装置;通过燃煤电站污染物脱除系统集成优化,建成1 000 MW燃煤电站污染物深度脱除的示范工程,为我国提供超净排放关键技术的示范。

4 结语

根据我国燃煤电站对雾霾的控制需求,对开发燃煤电站烟气污染物深度脱除技术存在的主要问题进行分析,提出了开发适用于我国1 000 MW超

超临界机组烟气污染物深度脱除技术的技术路线和需要攻克的关键技术。经分析论证,上述安排是可行的。

从研发到工程应用的全过程管理上,通过建立湿法脱硫和湿式电除尘器一体化中试装置,开发了燃煤电站烟气污染物深度脱除的关键技术和工艺。以此为依据,完成660 MW超临界机组烟气污染物深度脱除的工程设计与工程建设,对开发的关键技术和关键设备进行验证。利用660 MW超临界机组烟气污染物深度脱除的工程技术,开发1 000 MW超超临界机组烟气污染物深度脱除技术,建设示范工程。以示范工程为依托,完成工程技术标准、电厂建设标准和运行标准,最终实现燃煤电站烟气污染物深度脱除的大规模推广。

参考文献

- [1] 张晓鲁. 发展先进燃煤发电技术提高能源利用效率[R]. 中国工程院—瑞典皇家工程院:能源效率研讨会报告,2012.
- [2] 张晓鲁. 超超临界燃煤发电技术的研究[C]//中国科协2004年学术年会电力分会暨中国电机工程学会2004年学术年会论文集. 海口,2004.
- [3] 张晓鲁. 600 MW超超临界燃煤机组的经济技术性能分析[C]//清洁高效燃煤发电技术协作网2008年会. 南京,2008.
- [4] 中国电力企业联合会. 2013年全国电力工业统计数据[R]. 2013.
- [5] 中国电力企业联合会. 中国电力减排研究2013[R]. 2013.
- [6] 姚强. PM_{2.5}的形成、来源与火电厂的对策[C]//2013年中国电机工程学会年会论文集. 贵阳,2013.
- [7] 王鹏,骆仲泱,徐飞,等. 复合式静电除尘器脱除电厂排放PM_{2.5}研究[J]. 环境科学学报,2007,27(11):1769-1792.
- [8] 莫华,朱法华,王圣,等. 湿式电除尘器在燃煤电厂的应用及其对PM_{2.5}的减排作用[J]. 中国电力,2013(11):66-69.

Analysis of flue gas pollutants deep-removal technology for coal-fired power plant

Zhang Xiaolu

(China Power Investment Corporation, Beijing 100033, China)

[Abstract] In recent years, frequent haze weather makes PM_{2.5} becoming the public hotspot. The control of PM_{2.5} has been added in the 2012 release ambient air quality standard. Under the

situation that our current flue gas pollutant control technology is difficult to remove $PM_{2.5}$, the development of the Flue Gas Pollutants Deep-removal Technology (DRT) for Coal-fired Power Plant for deep-removing $PM_{2.5}$, SO_2 , SO_3 , heavy metals and other pollutants, is becoming an urgent problem. Basing on the analysis of the necessity and existing problems of developing DRT suitable for China, this study focused on the $PM_{2.5}$ removal technology, low NO_x emission of ultra supercritical boiler under full load, and the adaptability of SCR working temperature. Finally, introduces the flue gas pollutant removal system with an example of a 2×660 MW supercritical power plant, and analyses the Roadmap of development of DRT for 1 000 MW ultra supercritical unit.

[Key words] coal-fired power plant; flue gas pollutants; deep-removal; $PM_{2.5}$ removal

(上接 30 页)

to 55 million in 2030. As acceleration of industrialization, urbanization and population aging processes and rapid changes of national lifestyle, the morbidity and mortality rates of chronic diseases are showing a rapid growth trend in China. Therefore, dealing with the prevalence of chronic non-communicable diseases is becoming one of the current major issues that must be considered as soon as possible in China. On the basis of summarizing the status of major chronic diseases in China, analyzing the key issues and key factors in chronic disease prevention and control and studying and summarizing the experience from the previous projects, this paper proposes the following recommendations for the strategies for chronic disease prevention and control and relevant system construction that China should adopt and develop: All relevant government departments should formulate corresponding policies; establish a coordinated and efficient work system with rational structure and clear division of tasks and responsibilities within the system; implement the development of “integrated medicine” in system, work norms and requirements and thereby improve the performance and efficiency in chronic disease prevention and control in China.

[Key words] chronic disease prevention and control; strategy and system construction