



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

燃煤电厂污染物脱除设备对 PM_{2.5} 排放影响的研究进展

夏祎旻¹, 吴建群¹, 杨松², 于敦喜¹, 徐明厚¹

(1. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉 430074; 2. 广东粤电靖海发电有限公司, 广东揭阳 515223)

摘要:对燃煤电厂传统的静电除尘技术进行改造是满足我国日益严格的污染物排放标准的必要前提。针对燃煤细颗粒物的生成机理、气体污染物脱除技术对细颗粒物排放影响及高效除尘技术进行了较全面的总结, 其中高效除尘技术部分主要包括对强化尾部除尘技术原理、优点和局限性及投运情况和源头控制技术机理, 发展趋势等方面的介绍。煤中无机矿物的气化凝结、异相作用和破碎是 PM_{2.5} 的主要形成机理。电厂 NO_x 和 SO_x 等污染物控制技术对 PM_{2.5} 的排放有复杂的影响作用。燃煤电厂可从强化尾部除尘、烟气预处理和燃烧源控制 3 个方面对 PM_{2.5} 排放加以控制。强化尾部除尘技术通过对传统除尘设备进行技术改造, 从而改善其对细颗粒物的脱除效果, 如高频电源除尘技术、湿电除尘技术、电袋复合除尘技术等。烟气预处理技术通过外加条件对进入除尘器之前的烟气进行处理, 使烟气中的细颗粒物发生团聚长大或降低烟温以提高除尘效率, 目前常用的有团聚技术和低低温电除尘技术。团聚技术又主要包括化学团聚、湍流团聚、蒸汽相变团聚、声波团聚等。燃烧源头控制细颗粒物生成技术可解决传统除尘设备存在的穿透窗口问题, 且无需增加额外设备, 经济型较高, 主要包括混煤燃烧技术和添加剂技术。深入理解气体污染物脱除技术对细颗粒物排放的影响将为燃煤细颗粒物排放控制提供一种新思路。

关键词: PM_{2.5}; 燃煤电厂; 超净排放; 脱除效率; 脱硫脱硝

中图分类号: X773

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2021)11-3645-12

Advances in the study of the effects of pollutant removal equipment on PM_{2.5} emissions in coal-fired power plants

XIA Yimin¹, WU Jianqun¹, YANG Song², YU Dunxi¹, XU Minghou¹

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. Guangdong Yudian Jinghai Power Generation Co., Ltd., Jieyang 515223, China)

Abstract: The transformation of the traditional electrostatic dust removal technology of coal-fired power plants is a necessary prerequisite for meeting increasingly stringent pollutant emission standards. The particle formation mechanisms during coal combustion, the influence of gas pollutant removal technology on the emission of fine particles and high-efficiency dust removal technology were reviewed. For the high-efficiency dust removal technology, it mainly includes the principle, advantages and limitations of enhanced tail dust removal technology, and the introduction to the operational situation, the mechanism of source control technology, and development trends. The main formation mecha-

收稿日期: 2020-11-01 修回日期: 2020-11-26 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1720

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600600); 国家自然科学基金资助项目(51676075); 中国博士后科学基金资助项目(2020M672351)

作者简介: 夏祎旻(1997—), 女, 江西九江人, 硕士研究生。E-mail: 506584261@qq.com

通讯作者: 于敦喜(1975—), 男, 湖北广水人, 教授, 博士生导师。E-mail: yudunxi@hust.edu.cn

引用格式: 夏祎旻, 吴建群, 杨松, 等. 燃煤电厂污染物脱除设备对 PM_{2.5} 排放影响的研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3645-3656.

XIA Yimin, WU Jianqun, YANG Song, et al. Advances in the study of the effects of pollutant removal equipment on PM_{2.5} emissions in coal-fired power plants[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3645-3656.



移动阅读

nisms of $PM_{2.5}$ are gasification, condensation, heterogeneity and fragmentation of inorganic minerals. Pollutant control technologies such as NO_x and SO_x in power plants have a complex impact on $PM_{2.5}$ emissions. There are mainly three technical routes for $PM_{2.5}$ emission reduction, i. e. enhanced tail dust removal, flue gas pretreatment, and combustion source control. The reform of traditional dust devices can improve the removal efficiency, such as high-frequency power precipitator, wet electrostatic precipitator and ultraclean electrostatic-fabric integrated precipitator. The flue gas pretreatment technology treats the flue gas before entering the dust collector through additional conditions, so that the fine particles will agglomerate and grow or reduce the flue gas temperature to improve the removal efficiency. At present, common technologies mainly include agglomeration technology and low-temperature electric dust removal. For particle agglomeration technology, it mainly consists of chemical agglomeration, turbulent agglomeration, heterogeneous condensation agglomeration, acoustic agglomeration. Combustion source control technology can solve the problem of penetration window, and does not need to add additional equipment, which is more economical. Combustion source control technology mainly includes mixed coal combustion technology and additive technology. An in-depth understanding of the impact of gaseous pollutant removal technology will provide a new idea for the control of fine particulate emissions from coal combustion.

Key words: $PM_{2.5}$; coal-fired power plant; ultra-low emission; removal efficiency; desulfurization and denitrification

我国“贫油少气富煤”的能源结构决定了当前及未来相当长的一段时间内一次能源主要以煤炭为主。2018年我国一次能源利用中煤炭占比为59%^[1]。据BP预测,到2040年,煤炭在能源消费中的占比仍将大于35%^[2]。我国超过50%的煤炭在电厂中进行燃烧利用,致使 NO_x 、 SO_x 、细颗粒物($PM_{2.5}$;空气动力学直径小于 $2.5\ \mu m$ 颗粒物)和重金属等污染物的大量排放,其中 $PM_{2.5}$ 为我国当前最主要的大气污染物。 $PM_{2.5}$ 的排放不仅会导致雾霾等环境问题,还会诱发呼吸道和心脏疾病^[3-5]。

虽然我国在2012年《空气质量标准》提出大气 $PM_{2.5}$ 限值,但至今仍未针对燃烧源的 $PM_{2.5}$ 排放制定相关标准。2015年,国家环保部、国家发改委和国家能源局联合发布《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》,将电厂烟尘排放质量浓度限值降至 $10\ mg/m^3$,低于美国($12.3\ mg/m^3$)和欧盟火电烟尘排放标准($30\ mg/m^3$),被称为最严格的排放标准^[6]。考虑到 $PM_{2.5}$ 的严重危害以及我国近年来在大气雾霾治理上的大量投入,未来制定标准进一步限制燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 排放将成为趋势^[7]。深入了解燃煤电厂污染物控制设备对 $PM_{2.5}$ 排放的影响有利于电厂颗粒物排放的预测和控制,也可进一步为国家制定燃烧源 $PM_{2.5}$ 排放标准提供参考。

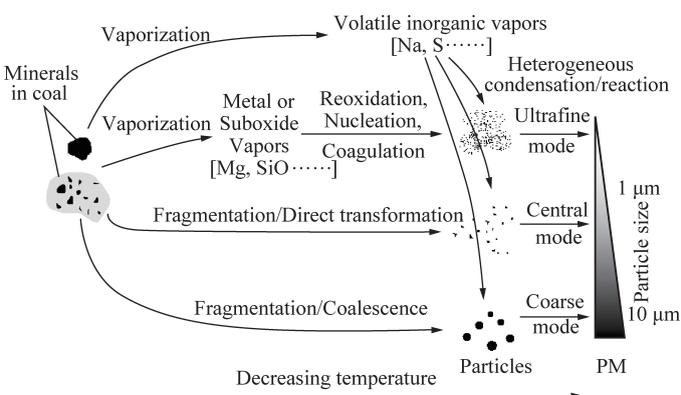
我国典型燃煤锅炉的污染物脱除系统主要包括 NO_x 脱除技术/设备、除尘设备和脱硫设备。其中除尘设备对 $PM_{2.5}$ 排放具有最重要的影响。当前我国90%以上的火电厂都采用静电除尘器(ESP)作为除尘设备^[8],虽然ESP的除尘效率可达99%以上,但其对 PM_1 脱除效率相对较低,导致 $PM_{2.5}$ 在逃逸粉尘中

比例高达90%以上^[9]。因此,必须对传统的静电除尘技术进行改造。除了除尘设备,低 NO_x 燃烧技术、脱硝和脱硫等环保技术/设备的应用也会对 $PM_{2.5}$ 的排放造成影响^[10-12],对其影响的全面认识是实现燃煤电厂颗粒物减排的必要条件。而对开发高效除尘技术以及全面认识环保设备对 $PM_{2.5}$ 排放的影响,关键在于对 $PM_{2.5}$ 生成机理的深入认识。基于以上分析,笔者主要针对燃煤 $PM_{2.5}$ 生成机理、电厂环保设备和技术对 $PM_{2.5}$ 排放的影响和高效除尘技术发展3个方面进行总结分析。

1 燃煤 $PM_{2.5}$ 生成机理

煤粉炉中 $PM_{2.5}$ 在飞灰中的占比为20%~60%,对 $PM_{2.5}$ 生成机理的准确认识是控制 $PM_{2.5}$ 生成和排放的理论基础。经典的三模态理论将生成途径相似的颗粒物归为一个模态^[13],笔者团队通过特征元素示踪法界定了三模态理论中超细模态、中间模态和粗模态颗粒物的粒径范围,并准确揭示了其形成机理^[14]。颗粒物3个模态粒径范围受燃料特性和燃烧条件的影响。一般而言,超细模态颗粒物粒径在 $0.12\ \mu m$ 以下,粗模态在 $0.8\ \mu m$ 以上,中间模态则位于两者之间。超细模态颗粒物和中间模态颗粒物是 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分。 $PM_{2.5}$ 的主要形成机理可总结如图1所示^[15],根据其形成途径主要可概括为气化成核、破碎、异相作用、熔融聚合和凝并聚结机理。

煤中无机矿物元素的气化-凝结是超细模态颗粒物的主要形成机理^[16]。根据气化温度不同可将煤中无机元素分为易气化元素和难气化元素。易气化元素Na、K和S的气化温度低,在煤热解阶段或燃烧

图 1 PM_{2.5} 生成机理^[15]Fig. 1 PM_{2.5} formation mechanisms^[15]

初期大量释放。难气化元素 Si, Al, Mg, Ca 和 Fe 等的氧化物气化温度远高于煤粉燃烧温度 (1 500 ~ 1 900 °C), 在中性或氧化性气氛下气化不明显。但还原性气氛下, 难气化元素氧化物发生还原反应, 并以气化温度更低的次氧化物或金属单质形式气化^[17]。当无机元素蒸气分压超过其饱和蒸气压时, 其蒸气会通过均相成核形成纳米级以下的颗粒物^[18]。

焦炭和矿物的破碎主要形成中间模态和粗模态颗粒物。发生破碎的原因主要包括热应力和颗粒内外压差产生的一次破碎和颗粒孔隙扩大而产生的逾渗破碎^[19]。其中热应力和颗粒内外压差的变化是无机矿物破碎的主要原因, 破碎的程度取决于矿物种类和燃烧温度。黄铁矿等可燃矿物和方解石等碳酸盐在高温下易于发生破碎^[20], 但是石英或高岭土等黏土矿物在锅炉中不易发生破碎^[21]。逾渗破碎是煤焦的主要破碎途径, 煤焦的逾渗破碎主要取决于其燃烧过程中大孔的演变^[19]。通常较高的挥发分和温度会导致煤焦热解过程膨胀更明显, 形成更丰富的大孔结构, 导致逾渗破碎更明显。焦炭的逾渗破碎会抑制内在矿的熔融聚合, 促进内在矿向细颗粒物迁移。

矿物的异相作用、熔融聚合和聚并聚结是颗粒物的主要长大形式。异相作用包括气化组分在小颗粒表面的凝结和反应, 是中间模态颗粒物的主要形成机理之一^[14, 19]。异相作用的细小颗粒主要来自内在矿的直接转化和外在矿的破碎。气化组分和凝结核浓度的增加均有利于异相作用的发生, 因此矿物气化或破碎的加剧均有利于中间模态颗粒物的生成^[19]。熔融聚合通常发生在煤焦表面。煤焦在锅炉中的燃烧温度高于烟气温度, 甚至可达 2 000 K, 高温下, 煤焦表面大部分矿物会发生熔融。如果煤焦不发生破碎, 煤焦表面熔融的矿物随着碳基质的燃尽会聚合形成一个煤灰颗粒^[22-23]。因此焦炭破碎程度的降低和

灰熔融程度的增强均有利于矿物的聚合。聚并是煤灰颗粒碰撞后通过固相扩散或黏性流动形成一个成分均匀的颗粒。颗粒碰撞能发生凝并的时间间隔(即凝并时间)是决定聚并颗粒大小的关键因素, 凝并时间越长, 颗粒生长粒径越大^[24]。矿物颗粒温度越高、固相扩散性越强、液相黏性越低, 则凝并时间越长。当凝并形成的灰粒径增大到一定程度时, 凝并将难以继续进行, 当温度低至不足以使碰撞颗粒发生凝并时, 颗粒之间会发生烧结聚结形成颗粒粒径大于 0.36 μm 的聚结物^[25]。矿物的熔融聚合和凝并聚结的发生有利于超细模态和中间模态颗粒物向粗模态颗粒物迁移。

2 气态污染物脱除技术对 PM_{2.5} 排放的影响

2.1 脱硝技术对 PM_{2.5} 排放的影响

目前基本所有的燃煤电厂均采用脱硝技术以实现烟气的低 NO_x 排放, 常用的脱硝技术主要包括低 NO_x 燃烧技术和烟气脱硝技术。低 NO_x 燃烧技术主要是通过使用低 NO_x 燃烧器或改变配风使得炉内存在局部还原性气氛并降低炉膛燃烧温度, 达到同时降低燃料型 NO_x 和热力型 NO_x 排放的目的^[26]。由 PM_{2.5} 的生成机理可知, 局部还原性气氛和燃烧温度的改变可能导致 PM_{2.5} 的生成特性发生变化。LINAK 等^[10] 实验室研究发现低 NO_x 分级燃烧技术对烟煤 PM₁ 的生成没有明显的影响, 但却显著促进褐煤 PM₁ 的生成, 笔者将褐煤 PM₁ 生成的增加主要归因于局部燃烧气氛增强引起的矿物气化加剧。但是 NIELSEN 等^[27] 对一台 250 MW 和一台 380 MW 机组颗粒排放的研究发现, PM₁ 的排放浓度与 NO_x 浓度没有明显的相关性。笔者团队^[11] 对安装低 NO_x 燃烧器的锅炉和采用常规燃烧器的锅炉颗粒物排放特性进行对比研究, 结果如图 2 所示, 发现低 NO_x 燃烧器使炉膛燃烧温度降低, 从而抑制矿物元素的气化, 导致 PM_{0.1} 的生成浓度降低; 同时发现低 NO_x 燃烧器产生的局部还原性气氛会促进矿物熔融, 颗粒物聚合更明显, 最终导致 PM₁₀ 向较粗粒径的飞灰迁移(其中, D_p 为颗粒物粒径, M 为颗粒物质量)。由以上分析可知关于低 NO_x 燃烧技术对 PM_{2.5} 生成的影响, 中外学者采用不同的煤种在不同燃烧设备上的研究结果并没有获得一致的结论, 未来需要在典型的燃煤机组上进行更系统的研究, 以获得更普遍的适应规律。

目前主要采用的烟气脱硝技术为选择性催化还原法(SCR), 国内外学者在实验室的研究结果发现烟气经过 SCR 后, 烟气中的 SO₂ 被氧化为 SO₃, SO₃ 与 NH₃ 或碱金属反应生成亚微米硫酸盐颗粒, 导致 PM₁

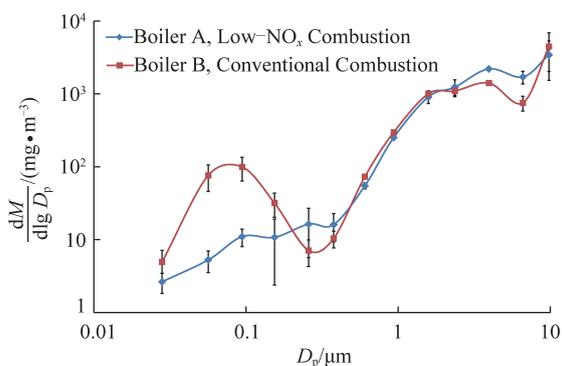


图2 国内200 MW燃煤锅炉低 NO_x 燃烧方式对颗粒物生成的影响

Fig. 2 Effect of low- NO_x combustion technologies on

particulate emissions from two 200 MW coal-fired boilers

生成浓度增加^[28-30]。这与王超等^[31]和刘芳琪等^[32]在实际电厂的试验结果相吻合。此外如图3所示,刘芳琪等^[32]还发现烟气流经蜂窝状催化剂时,由于壁面惯性碰撞、拦截可分离脱除部分粗颗粒,同时,烟气中的 SO_2 在催化剂作用下部分转化为 SO_3 ,与喷入的 NH_3 反应生成硫酸铵或硫酸氢铵在颗粒物表面沉积,促使小粒径颗粒物长大,最终可使得经过SCR后的烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度降低约10%。

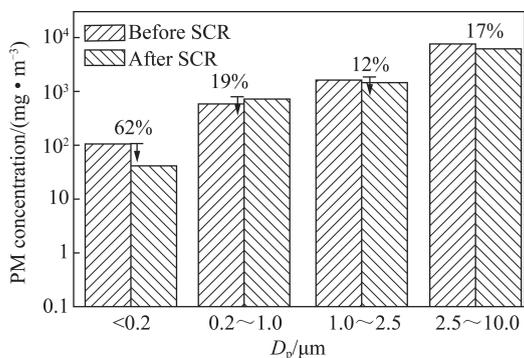


图3 SCR前后颗粒物质量浓度

Fig. 3 PM concentration before and after SCR

2.2 脱硫技术对 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的影响

目前,我国93%以上的燃煤电阻安装了脱硫装置,其中石灰石-石膏湿法脱硫(WFGD)占火电脱硫装置90%以上^[33]。WFGD主要是利用石灰石浆液在吸附塔与烟气中的 SO_2 反应从而达到脱硫的目的^[34]。WFGD对颗粒物排放的影响已获得较一致的认同:一方面,浆液的淋滤可以脱除部分颗粒物;另一方面,烟气在流经石灰石浆液时可能会夹带部分浆液颗粒,导致颗粒物排放浓度增加。MEIJ等^[12]研究发现,600 MW电厂安装WFGD后,烟尘排放量从 100 mg/m^3 大幅降至 10 mg/m^3 ,王琿等^[35]在国内一台300 WM锅炉上的实验发现WFGD对烟尘的脱除

率可达到约74.5%,同时发现WFGD淋滤作用对粗颗粒脱除效率较高,而对 $\text{PM}_{2.5}$ 脱除效果不明显,且颗粒物粒径越小,脱除效果越差,主要有2个方面原因:①颗粒物粒径越小,越容易被烟气携带排放到大气中;②湿法脱硫喷淋的细小浆液液滴及蒸发形成的石灰石或石膏颗粒会被烟气携带出吸附塔,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度升高。周科等^[36]的研究进一步证明了WFGD仅对超微米颗粒的脱除有效果,并且脱硫塔中Ca和S向亚微米颗粒物的转化会导致亚微米颗粒物排放质量浓度升高。经计算,细颗粒物中S元素的质量浓度增加 3.0 mg/m^3 ,Ca元素的质量浓度增加 1.1 mg/m^3 ,增加的Ca和S元素在脱硫装置内转化为细微颗粒物,使细颗粒物质量浓度升高。

3 高效 $\text{PM}_{2.5}$ 减排技术发展

目前控制燃煤 $\text{PM}_{2.5}$ 主要通过强化尾部除尘技术、烟气预处理技术、从燃烧源头上降低 $\text{PM}_{2.5}$ 生成3条技术路线,其在实现 $\text{PM}_{2.5}$ 减排上具有相互协同的关系,可根据实际电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 排放效果及经济效益采用一种或多种技术。需要注意的是烟气预处理技术和源头控制 $\text{PM}_{2.5}$ 技术均需要依靠尾部除尘设备对飞灰进行捕集。

3.1 尾部除尘强化技术

尾部除尘强化技术是电厂目前进一步降低颗粒物排放最常用的技术手段,主要包括高频电源除尘技术、湿电除尘技术以及电袋复合除尘技术等。表1为3种除尘技术在国内燃煤电厂应用情况。

表1 高效除尘设备现场应用情况

Table 1 On-site application of high-efficiency dust removal equipment

类型	安装位置	烟尘质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$)		机组负荷
高频电源除尘	改造前	改造前	改造后	上海外高桥
		出口:42.0	出口:17.0	
	改造后	改造前	改造后	台山电厂
		出口:29.8	出口:25.5	
湿电	ESP和WFGD之后	入口:	出口:	300 MW
		46.1~70.7	4.4~8.7	机组 ^[45]
	之后	入口:	出口:	华能日照二期
		22.6~23.8	4.4~4.9	680 MW ^[46]
电袋	取代ESP	入口:	出口:	300 MW
		4 180~6250	8~10	机组 ^[51]
	ESP	入口:	出口:	沙角C电厂
		12 333	3.7	660 MW 机组 ^[52]

高频电源除尘技术与 ESP 除尘机理相似,区别在于高频电源除尘装置的工作电源频率一般为 20~50 kHz,远高于工频电除尘装置的工作电源频率 50 Hz^[37]。高频电源具有更大的电晕功率,因此具有更强的荷电能力,静电除尘效率也会相应提高;同时静电除尘器能耗降低。上海外高桥某电厂进行高频电源静电除尘改造后,烟尘减排率达 59.5%,电除尘器能耗降低 71.7%^[38]。台山某电厂对 2 台 1 000 MW 机组的静电除尘器进行高频电源改造后,除尘器的除尘效率从 99.65% 升至 99.78%。但现场应用过程发现高频电源静电除尘器无法避免除尘器振打时的二次扬尘,机组快速升负荷和高负荷运行时易出现粉尘排放短暂超标等问题^[39]。同时,高频电源实际运行效果受煤质(对中低比电阻和高浓度的煤灰效果较佳)影响,因此在进行高频电源改造时必须配合其他除尘改造措施^[40]。

湿式静电除尘器(WESP)与 ESP 工作原理的不同之处在于 ESP 通过振打清灰,而 WESP 为连续水膜冲刷清灰,避免了反电晕和二次扬尘问题^[41]。在高湿环境下,烟气相对湿度易接近饱和甚至过饱和,此时水汽可能在颗粒表面发生异相凝结从而促进颗粒长大,达到提高除尘效率的目的。如图 4 所示,WESP 常作为烟气净化最后一个环节,安装在 WFGD 后,高效捕集高湿烟气中的 PM_{2.5}^[42-43]。截至 2017 年,WESP 在我国煤电中的装机量达到 13.3%^[44]。雒飞等^[45]和司小飞等^[46]分别对 300 MW 和 680 MW 燃煤机组增加 WESP 后颗粒物排放质量浓度进行检测,结果显示 WESP 出口烟尘均达到 10 mg/Nm³ 以下的超净排放标准。XU 等^[43]分析了某 300 MW 机组 WESP 对 PM_{2.5} 的脱除效果,发现 WESP 对 PM_{2.5} 具有较佳的控制效果,其对 PM_{2.5} 脱除效率可达 70%~94%。CHANG 等^[47]和 MONTGOMERY 等^[48]的研究发现 WESP 不仅对颗粒物有高效捕集效果,对烟气中 SO₃ 和重金属汞同样有很好的脱除作用。优化后的湿式除尘技术对 SO₃ 酸雾的脱除效率可达 99.2%,对元素态的汞脱除效率可达 90%。但 WESP 投资费用较高,其喷水过程会导致烟气温度降低,在采用不间断喷水时需要加装烟气再热装置,同时 WESP 需要消耗水,不适合在缺水地区使用。

复合式除尘技术是将 2 种传统除尘设备串联或将一种除尘设备嵌入到另一种设备中,以达到提高除尘效率的目的,2 种除尘设备在除尘效果上相互促进,而非简单的相互叠加^[8]。电袋除尘技术是目前电厂最常用的复合除尘技术,截至 2017 年,电袋除尘在国内燃煤电厂装机量已达 25.4%^[44]。该技术是将

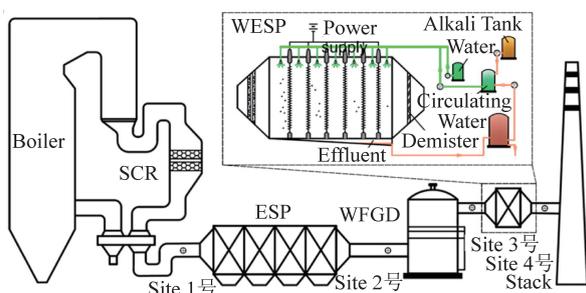


图 4 国内 1 000 MW 燃煤锅炉 WESP 系统^[43]

Fig. 4 Sketch of the 1 000 MW power stations equipped with WESP system²³

静电除尘器和布袋除尘器进行耦合,通过前端静电除尘器将大量的飞灰去除(可高达 90%),减少后端布袋除尘器数量,同时经静电除尘器荷电后的颗粒物更易于被布袋除尘器捕集,电袋复合除尘对 PM_{2.5} 的脱除效率可达 98%~99%,其结构如图 5 所示。

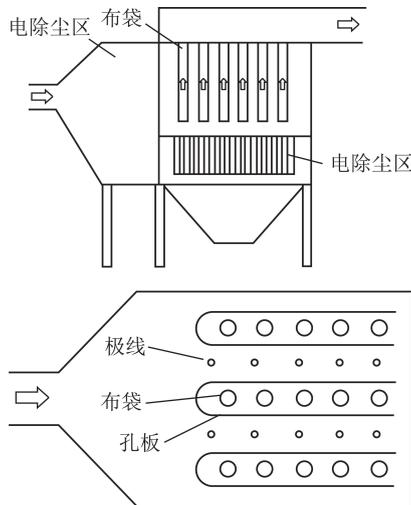


图 5 电袋除尘器结构示意图^[9]

Fig. 5 Schematic of electrical bag composite precipitator^[9]

电袋除尘技术除尘效率受煤灰比电阻影响较小,因此对煤质适应性强^[49-50]。聂孝峰等^[51]对 3 台 300 MW 机组和 1 台 135 MW 机组电袋除尘器除尘效率进行测试,发现电袋除尘器对 PM_{2.5} 脱除效率均达到了 99.7% 以上,对总汞的脱除效率达到了 70%,远高于传统静电除尘器对汞的脱除效率(在 45% 左右)。黄炜等^[52]提出通过合理的调节极板距离和荷电电压,选择合适的布袋加工工艺和材料能够进一步提高电袋除尘器的除尘效率。沙角 C 电厂采用优化的超净电袋除尘器后,可使得除尘器出口总尘质量浓度降至约 3.7 g/Nm³,除尘效率达到 99.97% (表 1)。然而电袋除尘器存在滤袋容易破损,滤袋易在运行过程中发生直通、渗透和针孔等问题,通常布袋的寿命在 2 a 左右,一个滤室中只要有一个布袋发生损坏就会对整体工作效率产生极大的影响。通过合理的布

置滤袋和选择滤袋材料可以有效的延长滤袋寿命。

上述几种尾部强化除尘技术各有优点和局限性,需结合实际合理选择,其中电袋复合除尘器比较适用于现役电除尘器提效改造。

3.2 烟气预处理技术

烟气预处理技术是对进入除尘设备中的烟气进行预处理,使得后续除尘设备对颗粒物脱除效率进一步提高,主要包括团聚技术和低低温省煤器技术。

3.2.1 团聚技术

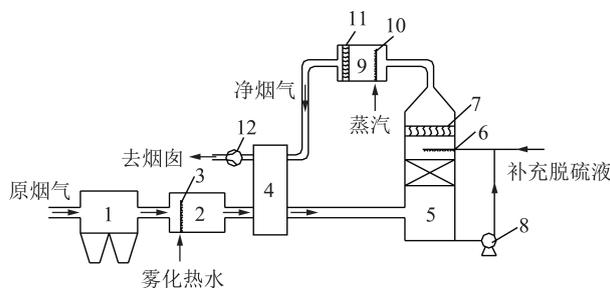
团聚技术指采用一定的技术手段使 $PM_{2.5}$ 通过物理或化学作用长大成较大颗粒后再加以脱除,目前主流的团聚技术有化学团聚、湍流团聚、蒸汽相变团聚、声波团聚等。

化学团聚技术通过高压空气将化学药剂配制而成的团聚剂喷入烟气中,细颗粒物与团聚剂发生碰撞后团聚长大。张军营研究团队^[53-56]和杨林军研究团队^[57-58]对此开展了一系列工作,研究表明化学团聚技术仅对燃烧后烟气进行预处理,对锅炉燃烧没有影响,化学团聚技术的提出为细颗粒物排放控制开辟了一条新途径。刘勇等^[57-58]研究了不同团聚剂对颗粒物团聚效果的影响,发现有机高分子团聚剂效果优于无机团聚剂,同时通过组合不同团聚剂、添加润湿剂和降低比电阻等手段可增加化学团聚效果,经过优化后的团聚剂在典型运行工况条件下可使电除尘器对细颗粒物的脱除效率提高 40% 以上。郭沂权等^[56]结合数值模拟方法,系统研究了团聚剂化学和物理特性、流量、物化液滴直径等因素对化学团聚效果的影响,将各因素耦合模拟,得到最优结果并应用于 2 台 340 MW 工业燃煤机组,发现 ESP 后颗粒物浓度降低 61.7%,WFGD 后颗粒物浓度降低 50%。化学团聚技术与湿式静电除尘器技术的运行费用相当,但前者投资费用仅为后者的一半^[56]。虽然化学团聚技术有诸多优点,但加入的化学团聚剂有可能增加除尘器的工作负荷,开发高效廉价的团聚剂仍是今后研究的趋势。

湍流技术指在除尘器前加装湍流聚并器,不同惯性的颗粒在湍流中产生速度梯度,加剧彼此间碰撞,从而促进团聚。湍流技术原理和设备简单、运行维护成本低且易于与其他除尘设施结合,因此具有较好的应用潜力,其关键在于聚并器的设计。2002 年澳大利亚 Indigo 公司开发了湍流聚并器^[59],通过边状、圆柱形和 Z 形涡片产涡装置形成小尺度湍流,加剧细颗粒碰撞机率。米建春等^[60-61]设计了包含大涡段和小涡段 2 部分的湍流聚并器,前部分的大涡段由大涡片构成,主要使烟尘产生大尺度分流;后部分的小

段主要包含矩形、锯齿形、梯形 3 种涡片,主要用于产生小尺度湍流。刘忠等^[62]通过模拟计算发现聚并器内流速越大、涡片越多则湍流越剧烈,颗粒团聚效果越好,但同时系统的阻力也会增大,且湍流对颗粒聚并效果存在最优值,当湍流增大到一定程度后聚并效果将不再增加。陈冬林等^[63]在某 300 MW 燃煤电厂中对加装聚并器前后 ESP 出口烟尘质量浓度进行测试,发现加装聚并器后 ESP 出口烟尘质量浓度由 103.935 mg/m^3 降至 77.595 mg/m^3 ,烟尘减排量达到 25.34%。目前,湍流技术实际应用较少,且聚并效果受烟气流速和温度影响,对烟气流速较小、温度较低工况效果较差,存在使用局限性。

蒸汽相变聚并是在饱和蒸汽中,蒸汽以颗粒物为凝结核在颗粒物表面凝结形成液滴,颗粒物碰撞后在表面液滴作用下团聚长大,可通过在烟气中加入水蒸气或采用湿空气产生饱和蒸汽实现。杨林军等^[64]利用湿法脱硫后高湿烟气特性提出将蒸汽相变器安装在湿法脱硫尾部,以提高 WFGD 系统对细颗粒的脱除效率,其技术路线如图 6 所示。



1—除尘器; 2—烟气湿度调节器; 3—雾化水喷嘴; 4—烟气再热器; 5—脱硫塔; 6—脱硫液喷嘴; 7—脱硫塔除雾器; 8—脱硫液循环泵; 9—相变凝结室; 10—蒸汽喷嘴; 11—相变凝结室除雾器; 12—引风机

图 6 湿法脱硫中协同脱除 $PM_{2.5}$ 技术路线示意^[64]

Fig. 6 Schematic of WFGD combined with removal of $PM_{2.5}$

研究发现,对于 $NH_3 \cdot H_2O$ 脱硫剂,当蒸汽添加量由 0.02 kg/m^3 变化至 0.08 kg/m^3 时,WFGD 对细颗粒物脱除效率由 43% 提高至 78%。考虑到蒸汽相变聚并器对粒径在 $3 \mu\text{m}$ 以下的颗粒物团聚效果较差,熊桂龙等^[65]采用撞击流与蒸汽相变结合的方法强化烟气中细颗粒的团聚,使细颗粒脱除效率由 35% 增加至 65%。蒸汽相变技术的运行效率和成本对烟气流量和温度较敏感,目前还未见该技术在现实燃煤电厂中应用或示范,缺乏其在实际电厂复杂烟气条件下的运行效果数据。

声波团聚技术是指颗粒物在高能量密度的声场中,被介质夹带而产生振动,不同粒径的颗粒物振幅和速度不同,导致颗粒物相互运动、碰撞,从而发生凝并团聚现象。声波团聚机理主要有同相凝并机理、流

体力学作用和湍流扩散、湍流惯性^[66-67]等。自 18 世纪末, KONIG^[68] 首先提出声场挟带细颗粒理论后, 各国学者进行了大量研究。TIWARY R 等^[69] 忽略重力沉降、布朗运动和声致湍流的影响提出了声波凝并的数值模型, 发现声强为 150~160 dB、频率为 1~2 kHz、停留时间为 2~4 s 时, 模型与实验结果吻合较好, 且平均粒径为 0.2 μm 的微粒经声波团聚后粒径可扩大 10 倍。GALLEGO-JUÁREZ J A 等^[70] 进行了高频 (10, 20 kHz) 声波团聚中试实验, 烟气量为 2 000 m³/h, 烟气温度为 150 °C, 含尘质量浓度为 1~5 g/m³, 发现细颗粒数质量浓度减少 40%。张光学等^[71-72] 发现声波团聚可使 PM_{2.5} 脱除效率由 80% 提到约 97%, 且最佳声波频率在 1 400 Hz 左右。此外, 张光学等^[73] 运用光学探究了频率、声功率及初始质量浓度对超细液滴气溶胶团聚效果的影响规律, 发现频率 6 kHz、声强为 148 dB 时, 液滴颗粒发生快速团聚, 质量浓度减少 99%。虽然声波团聚已有近百年的研究历史, 但其耗能较大, 且会产生噪声危害。据报道^[74], 目前国内只有青岛某 300 MW 机组上投运使用声波团聚技术, 排放质量浓度低于 10 mg/m³。今后声波团聚技术还需在有效降低能耗、研制高温环境下能长期使用且能量转换效率高的声源等方面努力。

目前外加条件下团聚长大技术的研究大都侧重团聚效率, 对这些团聚现象的成因机制还需更深入的研究。经济性上, 化学团聚与蒸汽相变技术的应用前景较为广阔, 特别适合与 WFGD 系统改造相结合。

3.2.2 低低温电除尘器

低低温电除尘技术工艺流程如图 7 所示, 通过在静电除尘器前加装低温省煤器, 使烟气温度降到露点 (通常为 90 °C 左右) 以下, 降低飞灰的比电阻, 提高除尘效率; 同时凝结在颗粒物表面的 SO₃ 液膜有利于颗粒物团聚, 提高对颗粒物的捕集能力。此外还能进一步回收烟气中的余热并协同脱除烟气中的 SO₃^[75]。20 世纪 70 年代澳大利亚 Liddell 电厂首次将低低温静电除尘技术投入实际应用^[76]; 日本三菱重工于 1997 年开始推广应用低低温电除尘技术, 成功将除尘器出口烟尘质量浓度降低到 30 mg/m³ 以下。截至 2017 年底, 低低温电除尘技术在我国燃煤电厂中的装机量已达 14.3%^[44]。WANG 等^[77] 对国内一台安装低低温电除尘器的 600 MW 燃煤机组进行颗粒物采样, 发现低温省煤器开启后颗粒物排放浓度明显降低, PM₁ 和 PM_{2.5} 减排效率达 60%~70%。胡建强等^[78] 发现某 1 000 MW 燃煤机组经低低温电除尘系统改造后, 除尘效率可提高 99.9% 以上, 除尘器出口

烟气质量浓度为 20 mg/m³, 配合 WFGD 使用后, 烟气出口质量浓度可降至 5 mg/m³ 以下。由于低温省煤器将烟气温度降低至露点以下, 低温省煤器及除尘设备均存在沾污堵灰及腐蚀等问题, 因此解决换热器沾污及腐蚀问题是低低温电除尘器进行大规模推广应用的必要前提。

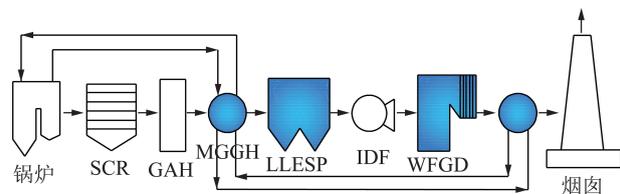


图 7 典型的低低温电除尘器工艺^[69]

Fig. 7 Schematic of typical low-low temperature ESP

3.3 燃烧源头控制技术

无论是尾部除尘强化技术还是烟气预处理技术, 均属于燃烧后颗粒物控制技术, 虽能有效降低颗粒物的排放量, 却无法消除传统除尘设备在粒径范围 0.1~1.0 μm 处存在的穿透窗口问题, 并且这些技术的应用会增加系统的投资成本, 降低系统的稳定性和协调性。因此有学者提出一种从燃烧源头上控制 PM_{2.5} 生成的方法, 即利用矿物与 PM_{2.5} 前驱体发生交互反应从而阻断前驱体向 PM_{2.5} 迁移。该方法相比于燃烧后 PM_{2.5} 强化脱除技术的优势在于: ① 可选择性降低在除尘设备中穿透率较高的超细模态和中间模态颗粒物的生成, 解决穿透窗口问题; ② 可基于矿物反应或吸附特性, 抑制特定毒性元素向 PM_{2.5} 迁移; ③ 无需额外增加设备, 运行成本较低, 使用灵活。

3.3.1 混煤燃烧技术

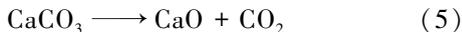
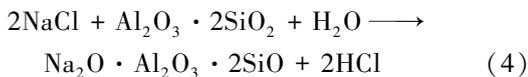
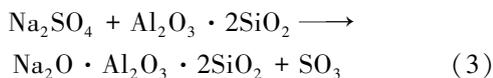
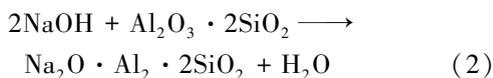
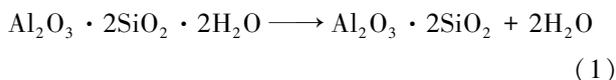
混煤燃烧技术主要通过将不同矿物特性的煤粉进行混配, 加剧颗粒物生成过程中的化学反应、异相作用和聚合等, 从而促进颗粒物长大, 减少 PM_{2.5} 的生成。WANG 等^[79] 对 2 种 Ca 含量不同的煤进行不同比例的混配燃烧实验, 发现混烧后 PM₁₀ 生成量低于单一煤加权平均计算得到的颗粒物理论生成量, 证明煤粉的混烧可实现颗粒物的减排。ZHOU 等^[80] 在沉降炉上研究不同比例褐煤与烟煤混烧对颗粒物 PM₁ 的控制效果, 发现当褐煤与烟煤质量比例为 7:3 时, PM₁ 的控制效果最好, 生成质量浓度约减少 38%, 并将最终 PM₁ 生成量降低的主要原因归结为褐煤燃烧生成的细颗粒中的 Ca、Fe 元素与烟煤中的硅铝酸盐粗灰颗粒发生交互反应。徐少波等^[81] 基于某电厂的配煤方案, 将 3 种烟煤分别与一种褐煤进行混烧, 发现在合适的混配比例下, PM_{2.5} 的生成可明显减少, 主要的机理是交互反应形成的具有熔融表面的硅铝酸盐对细颗粒的液相捕集; 同时进一步提出当灰中

Fe₂O₃与CaO的物质的量比接近1时,PM_{2.5}减排效果最明显。张平安等^[82]考虑多种矿物交互作用,提出了基于煤灰化学成分混煤燃烧控制颗粒物生成的指导原则,即:SiO₂/Al₂O₃ = 1 ~ 3, (MgO + CaO + Fe₂O₃)/(MgO+CaO+Fe₂O₃+SiO₂+Al₂O₃) ≈ 0.25 为最有利于液相物质生成和颗粒团聚发生的矿物组成。在该指导原则下,实现了超细模态颗粒物最高减排68.7%,中间模态颗粒物减排13.2%。虽然目前大多数电厂采用混煤作为燃料,但有关实际锅炉燃烧复杂流场和温度场对颗粒物生成的影响、液相组分对锅炉灰沉积问题的影响等方面仍需进一步评估。

3.3.2 添加剂

添加剂控制方法主要通过外加矿物来阻断颗粒物前驱体向PM_{2.5}迁移,从化学反应和物理液相捕集2方面减少PM_{2.5}的生成。

化学反应机理主要通过外加矿物与无机矿物元素蒸气反应,从而减少气相产物向PM_{2.5}迁移。主要有硅基或硅铝基矿物及钙基矿物等添加剂。其中硅基和硅铝基主要与碱金属蒸气反应,以高岭土添加剂与Na蒸气为例,反应机理如式(1)~(4)所示。钙基吸附剂主要与含S或Cl气体反应,以方解石与SO₂反应为例,反应机理如式(5),(6)所示。



物理液相捕集主要通过外加矿物与煤中矿物反应,增加煤灰中液相比例,从而对异相反应形成的细颗粒核或已形成的PM_{2.5}颗粒物进行捕集。主要有钙基、硅铝基和镁基等添加剂。实际上,化学反应吸附气相无机矿物后,添加剂表面易产生液相低温共熔体,从而进一步促进添加剂的液相捕集。因此添加剂控制PM_{2.5}生成的机理通常会同时包括化学反应和物理捕集。但2种作用机理受温度影响特性不同,化学吸附发生在某温度区间段,温度太低化学反应速率较慢,温度太高颗粒表面易烧结或发生其他化学反应导致添加剂失效;对于液相捕集,温度升高矿物颗粒表面熔融液相更明显,故捕集效果也更明显。

目前研究较多的添加剂包括硅基、钙基、镁基、钛

基添加剂等^[83-86],其特性见表2。

表2 不同添加剂特性

Table 2 Characteristics of different additives

项目	硅基/ 硅铝基	钙基	镁基	钛基
种类	高岭土, 氧化铝, 二氧化硅	方解石	氢氧化镁, 醋酸镁	锐钛矿
减排机理	碱金属气相捕集	酸性气体捕集	液相捕集	碱金属蒸汽捕集
优点	来源广,价格适宜,低温对超细颗粒物减排效果好	来源广,价格低廉,可实现高硫煤PM _{2.5} 高效减排	高温,适应性强	高温,适应性强
缺点	高温效果差	高温效果差,受S含量影响	可能导致沾污问题	价格昂贵,对PM _{2.5} 脱除效率较低

硅铝基添加剂由于材料来源广、经济性较高、对PM_{2.5}控制效果较佳而备受关注。徐义书等^[6]在沉降炉中对8种硅铝基进行筛选实验,发现高岭土对PM_{2.5}的生成具有良好的控制效果,减排效率可达22%。其随后在1 000 MW燃煤机组中对高岭土控制PM_{2.5}生成效果进行测试,发现添加高岭土后ESP出口PM₁降低约35%,PM_{2.5}降低约36%,证明高岭土对PM_{2.5}具有良好的控制效果,其控制机理包含添加剂对碱金属蒸气的化学捕集以及对细颗粒的液相捕集^[83]。为进一步提高硅铝基添加剂对PM_{2.5}的脱除能力,学者们^[87-88]采用盐酸高锰酸钾、氢氧化钠、盐酸、硫酸铝和盐酸等溶液以及胍对硅铝基添加剂进行改性。改性后的硅铝基添加剂比表面积及活性官能团增加,使得其对碱金属蒸气吸附能力提高13%~41%,具体提升效果取决于改性方法及原样特性。

值得注意的是添加剂对不同特性煤种的适应性存在局限性,大部分矿物添加剂成本较高。故考虑到吸附剂的经济性与广泛适用性,仍然需要开发研究更多、更有效的颗粒物吸附剂来应对实际电站不同的需求。此外关于添加剂利用率、成本、对粉煤灰性质的影响等方面也是今后需关注的地方。

4 结 语

基于我国以煤为主的能源结构,发展高效除尘技术是我国燃煤电厂实现超低排放的必经之路。静电除尘器是我国火电厂最常用的除尘设备,其对燃煤烟气中粗颗粒物的收集效率可达99.9%以上,但对质

量浓度不高、数量浓度较高的 PM_{2.5} 存在穿透窗口问题。在节能减排与环境污染的双重压力下,采用单一的除尘措施已无法满足日益严格的排放标准。基于此并结合 PM_{2.5} 生成机理,3 条高效除尘技术路线应运而生。其中尾部强化除尘技术与烟气预处理技术均属于燃烧后控制,虽具有较好的减排效果,但如何维持系统长期高效的稳定运行、降低投资成本仍有待进一步研究。基于静电增强的多机理复合除尘技术耦合团聚技术是未来的一个发展趋势,以湿法脱硫系统应用蒸汽相变技术为例,其不仅可高效脱除细颗粒物,还可协同脱除金属汞、SO₃ 等污染物,具有较好的应用前景。近年来以炉内添加高岭土(硅铝基添加剂)为代表的燃烧源头控制 PM_{2.5} 生成技术不断受到国内外学者的关注,该技术具有减排效果佳、无需额外增加设备、运行成本低等优点。此外,硅铝基添加剂改性后可进一步提升脱除效率,将为今后定向控制 PM_{2.5} 生成提供一条新途径。

参考文献 (References):

- [1] 国家统计局(2019). 中国统计年鉴[EB/OL]. [2021-10-18]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj./ndsj/>.
- [2] BP. BP Energy Outlook[EB/OL]. [2021-10-18]. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>.
- [3] YU Dunxi, XU Minghou, HONG Yao, et al. Size distributions of major elements in residual ash particles from coal combustion[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 958-964.
- [4] VERANTH J M, SMITH K R, HUGGINS F, et al. Mossbauer spectroscopy indicates that iron in an aluminosilicate glass phase is the source of the bioavailable iron from coal fly ash[J]. Chemical Research in Toxicology, 2000, 13(3): 161.
- [5] ANDERSON J O, THUNDIYIL J G, STOLBATH A. Clearing the air: A review of the effects of particulate matter air pollution on human health [J]. Journal of Medical Toxicology, 2012, 8(2): 166-175.
- [6] 徐义书. 煤中矿物质定向调配对超细颗粒物生成的影响规律和现场研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
XU Yishu. Directional control of mineral matter migration for reducing ultrafine PM formaton during coal combustion; mechanism and field study[D]. Wuhan: Huangzhong University of Science and Technology, 2017.
- [7] 第七届教育部科技委能源与交通学部. 中国能源与交通领域战略研究报告[M]. 北京:科学出版社, 2020: 15-17.
- [8] YAO Q, LI S Q, XU H W, et al. Reprint of: Studies on formation and control of combustion particulate matter in China; A review[J]. Energy, 2010, 35(11): 4480-4493.
- [9] 靳星. 静电除尘器内细颗粒物脱除特性的技术基础研究[D]. 北京:清华大学, 2013.
JIN Xing. Research on capture technology of fine particles in electrostatic precipitator[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [10] LINAK W P, PETERSON T W. Effect of coal type and residence time on the submicron aerosol distribution from pulverized coal combustion[J]. Aerosol Science & Technology, 1984, 3(1): 77-96.
- [11] YU D X, Wen C, Xu M H. Effect of low-NO_x combustion on PM₁₀ emissions from pulverized-coal-fired boilers[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(10): 5811-5815.
- [12] MEIJ R, WINKEL B T. The emissions and environmental impact of PM₁₀ and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(6/7): 641-656.
- [13] LINAK W P, MILLER C A, SEAMES W S, et al. On trimodal particle size distributions in fly ash from pulverized-coal combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 441-447.
- [14] YU D X, XU M H, YAO H, et al. Use of elemental size distributions in identifying particle formation modes[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 200, 31(2): 1921-1928.
- [15] ZHANG Ping'an, YU D X, LUO G Q, et al. Temperature effect on central-mode particulate matter formation in combustion of coals with different mineral compositions [J]. Energy & Fuels, 2015, 29(8): 5245-5252.
- [16] NEVILLE M, QUANN R J, HAYNES B S, et al. Vaporization and condensation of mineral matter during pulverized coal combustion[J]. Symposium on Combustion, 1981, 18(1): 1267-1274.
- [17] QUANN R J, SAROFIM A F. Vaporization of refractory oxides during pulverized coal combustion [J]. Symposium on Combustion, 1982, 19(1): 1429-1440.
- [18] CHRISTENSEN K A, LIVBJERG H. A plug flow model for Chemical reactions and aerosol nucleation and growth in an alkali-containing flue gas [J]. Aerosol Ence & Technology, 2000, 33(6): 470-489.
- [19] 于敦喜. 燃煤细颗粒物的模态识别及其形成机理[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
YU Dunxi. Particle mode identification and formation mechanisms during coal combustion[D]. Wuhan: Huangzhong University of Science and Technology, 2007.
- [20] YAN L, GUPTA P, WALL T. Fragmentation behavior of pyrite and calcite during high-temperature processing and mathematical simulation [J]. Energy & Fuels, 2001, 15(2): 389-394.
- [21] RAASK E. Mineral impurities in coal combustion, behavior, problems, and remedial measures [M]. Newyork: Hemisphere Publishing, 1985.
- [22] RAMSDEN A R. A microscopic investigation into the formation of fly-ash during the combustion of a pulverized bituminous coal [J]. Fuel, 1969, 48(2): 121-137.
- [23] 高琦. 煤粉燃烧全粒径飞灰生成机理研究[D]. 北京:清华大学, 2019.
GAO Qi. Mechanistic studies on the formation of fly ash particles in full sizes during pulverized coal combustion [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [24] HU Z, WANG X, TAN H, et al. A coupling study of potassium sul-

- fation chemistry and aerosol dynamics for a KCl/SO₂/O₂/H₂O system[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(10): 12951–12959.
- [25] KAUPPINEN E I, PAKKANEN T A. Coal combustion aerosols; A field study [J]. *Environmental Science & Technology*, 1990, 24(12): 1811–1818.
- [26] 陈晓峰, 郭道清, 苏翔. 燃煤电厂烟气脱硝技术现状探讨分析[J]. *科协论坛(下半月)*, 2012(4): 31–33.
CHEN Xiaofeng, GUO Daoqing, SU Xiang. Discussed and analyzed of the current situation for flue gas denitrification technology in coal-fired power plants[J]. *Science & Technology Association Forum*, 2012(4): 31–33.
- [27] NIELSEN M T, LIVBJERG H, FOGH C L, et al. Formation and emission of fine particles from two coal-fired power plants[J]. *Combustion Science & Technology*, 2002, 174(2): 79–113.
- [28] 范红梅, 张玉华, 束航, 等. SCR脱硝过程中细颗粒物排放特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(1): 321–329.
FAN Hongmei, ZHANG Yuhua, SHU Hang, et al. Characteristics of fine particulates emission from SCR reactor[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2016, 47(1): 321–329.
- [29] 杨林军, 史雅娟, 骆律源. 燃煤烟气SCR脱硝系统中细颗粒物排放特性综述[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(16): 4342–4348, 4517.
YANG Linjun, SHI Yajuan, LUO Liyuan. Review of emission characteristics of fine particles during coal-fired SCR DeNO_x[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(16): 4342–4348, 4517.
- [30] SVACHULA J. Oxidation of SO₂ to SO₃ over honeycomb DeNO_x catalysts[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1993, 32(5): 826–834.
- [31] 王超, 刘小伟, 吴建群, 等. 220 MW 热电联产锅炉中痕量元素的迁移及分布特性[J]. *化工学报*, 2014, 65(9): 3604–3608.
WANG Chao, LIU Xiaowei, WU Jianqun, et al. Migration and distribution characteristics of trace elements in 220 MW cogeneration boiler[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2014, 65(9): 3604–3608.
- [32] 刘芳琪, 于敦喜, 吴建群, 等. 燃煤锅炉SCR对颗粒物排放特性影响[J]. *化工学报*, 2018, 69(9): 4051–4057.
LIU Fangqi, YU Dunxi, WU Jianqun, et al. Effect of SCR on particulate matter emissions from a coal-fired boiler [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2018, 69(9): 4051–4057.
- [33] 王军锋, 李金, 徐惠斌, 等. 湿法脱硫协同去除细颗粒物的研究进展[J]. *化工进展*, 2019, 38(7): 3402–3411.
WANG Junfeng, LI Jin, XU Huibin, et al. Advances in research on wet desulfurization and synergistic removal of fine particles [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(7): 3402–3411.
- [34] 韩松. 火电领域石灰石湿法脱硫技术的应用进程研究[J]. *中国环保产业*, 2020(1): 33–36.
HAN Song. Progress research on application of limestone wet desulfurization technology in power plant field[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2020(1): 33–36.
- [35] 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(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 CSEE*, 2008(5): 1–7.
- [36] 周科, 聂剑平, 张广才, 等. 湿法烟气脱硫燃煤锅炉烟气颗粒物的排放特性研究[J]. *热力发电*, 2013, 42(8): 81–85, 89.
ZHOU Ke, NIE Jianping, ZHANG Guangcai, et al. Emission characteristics of particulate matter from coal-fired plant equipped with WFGD [J]. *Thermal Power Generation*, 2013, 42(8): 81–85, 89.
- [37] 陈多. 高频电源在火电厂电除尘上的研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
CHEN Duo. Investigation and application of high frequency power supply in electric dust collector of power plants [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [38] 朱法华, 李辉, 王强. 高频电源在我国电除尘器上的应用及节能减排潜力分析[J]. *环境工程技术学报*, 2011, 1(1): 26–32.
ZHU Fahua, LI Hui, WANG Qiang. Application of high frequency power supply for ESP in the power industry of China and its potential for energy saving and emissions reducing [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2011, 1(1): 26–32.
- [39] 高峰, 赵曙伟. 高频电源电除尘的节能减排效应[J]. *广东电力*, 2015, 28(7): 36–39.
GAO Feng, ZHAO Shuwei. Effect of energy conservation and emission reduction of high-frequency power source electric precipitation [J]. *Guangdong Electric Power*, 2015, 28(7): 36–39.
- [40] 赵子玮, 胡志光, 李庆. 适用于电除尘器改造的新技术[J]. *华北电力技术*, 2015(3): 60–65.
ZHAO Ziwei, HU Zhiguang, LI Qing. New technology applied for ESP reform [J]. *North China Electric Power*, 2015(3): 60–65.
- [41] MIZUNO A. Electrostatic precipitation [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2000, 7(5): 615–624.
- [42] 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, 4513.
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 CSEE*, 2016, 36(16): 4308–4318, 4513.
- [43] XU Yishu, LIU Xiaowei, CUI Jiang, et al. Field measurements on the emission and removal of PM_{2.5} from coal-fired power stations; 4. PM removal performance of wet electrostatic precipitators [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30: 7465–7473.
- [44] 中国电力企业联合会. 2017年度火电厂环保产业登记信息 [EB/OL]. [2021-10-18]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-6007>.
- [45] 雒飞. 湿式电除尘增强PM_{2.5}/SO₃酸雾脱除的研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
LUO Fei. Study on PM_{2.5} and SO₃ acid mist removal by wet electrostatic precipitator [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [46] 司小飞, 李元昊, 聂鹏. 火电厂超低排放及湿式电除尘器的改造探讨[J]. *环境工程*, 2016, 34(S1): 618–622.
SI Xiaofei, LI Yuanhao, NIE Peng. Discussion on the transformation

- of ultra low emission and wet electric dust collector in thermal power plant [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34 (S1): 618-622.
- [47] CHANG Jingcai, DONG Yong, WANG Zhiqiang, et al. Removal of sulfuric acid aerosol in a wet electrostatic precipitator with single terylene or polypropylene collection electrodes [J]. *Journal of Aerosol Ence*, 2011, 42(8) :544-554.
- [48] MONTGOMERY J L, WHITWORTH C G, BAEELSON D M, et al. Developments of the plasma-enhanced electrostatic precipitator for mercury removal in offgas [J]. *Environmental engineering science*, 2005, 22(2) :264-271.
- [49] 黄斌,姚强,宋蕾,等. 静电对纤维滤料过滤飞灰颗粒的影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(24) :106-110.
HUANG Bin, YAO Qiang, SONG Qiang, et al. Effect of the electrostatics on the fibrous filter filtrating fly ash [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(24) :106-110.
- [50] 刘练波,许世森. 静电布袋复合除尘器的试验研究 [J]. *动力工程*, 2007(1) :103-106, 139.
LIU Lianbo, XU Shisen. Experimental study of hybrid electrostatic-bag type dust collector [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2007(1) :103-106, 139.
- [51] 聂孝峰,李东阳,郭斌. 燃煤电厂电袋复合除尘器技术优势 [J]. *电力科技与环保*, 2013, 29(1) :24-27.
NIE Xiaofeng, LI Dongyang, GUO Bin. The advantage of electrostatic and fabric composite filter on coal-fired power plants [J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2013, 29(1) :24-27.
- [52] 黄炜. 超净电袋除尘技术的研究与应用 [J]. *中国环保产业*, 2015(7) :27-32.
HUANG Wei. Research and application on ultra-clean electrostatic bag precipitation technology [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2015(7) :27-32.
- [53] GUO Yiquan, ZHANG Junying, ZHAO Yongchun, et al. Chemical agglomeration of fine particles in coal combustion flue gas; Experimental evaluation [J]. *Fuel*, 2017, 203:557-569.
- [54] GUO Yiquan, ZHAO Yongchun, WANG Shaolong, et al. Relationship between the zeta potential and the chemical agglomeration efficiency of fine particles in flue gas during coal combustion [J]. *Fuel*, 2018, 215:756-765.
- [55] 郭沂权,张军营,赵永椿,等. 50 MW 燃煤电站锅炉细颗粒物化学团聚示范工程试验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(S1) :87-94.
GUO Yiquan, ZHANG Junying, ZHANG Yongchun, et al. Experimental research on fine particles chemical agglomeration demonstration project in a 50 MW coal-fired power plant boiler [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(S1) :87-94.
- [56] 郭沂权. 燃煤飞灰细颗粒物化学团聚强化除尘机制的研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2018.
GUO Yiquan. Research on chemical agglomeration enhanced dust removal mechanism of fine particulate matter in flue gas during coal combustion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [57] LIU Yong, HU Bin, ZHOU Lei, et al. Improving the removal of fine particles with an electrostatic precipitator by chemical agglomeration [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(10) :8441-8447.
- [58] 刘勇. 应用化学团聚增强细颗粒物脱出的试验研究 [D]. 南京:东南大学, 2017.
LIU Yong. Research on the removal of fine particle by chemical agglomeration [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [59] 刘含笑,郦建国,姚宇平,等. PM_{2.5} 湍流聚并方法研究进展 [J]. *中国环保产业*, 2013(4) :27-30.
LIU Hanyao, LI Jianguo, YAO Yuping, et al. Research progress on PM_{2.5} turbulent flows and assembling method [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2013(4) :27-30.
- [60] 米建春,杜诚,杨立清. 促进颗粒物相互作用的装置及方法 [P]. 中国专利:CN201010504951. 4, 2010-10-8.
MI Jianchun, DU Cheng, YANG Liqing. A device and method for accelerating particulate matters to interact with each other [P]. China Patent: CN201010504951. 4, 2010-10-8.
- [61] LIU H X, LIU Z, LI H L, et al. Multiple vortex body vortex numerical simulation [A]. *Advanced Materials Research [C]. Trans. Tech. Publications Ltd.*, 2011, 328:1755-1758.
- [62] 刘忠,刘含笑,冯新新,等. 湍流聚并器流场和颗粒运动轨迹模拟 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(14) :71-75.
LIU Zhong, LIU Hanyao, FENG Xinxin, et al. Simulation for the flow field of the turbulence coalescence device and the trajectory of particles [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(14) :71-75.
- [63] 陈冬林,吴康,米建春,等. 300MW 燃煤锅炉机组超细颗粒聚并器的实验研究 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(4) :1926-1930.
CHEN Donglin, WU Kang, MI Jianchun, et al. Experimental study of ultrafine particle agglomerator installed on a 300 MW PC-fired boiler [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(4) :1926-1930.
- [64] 杨林军,张霞,孙露娟,等. 湿法脱硫中应用蒸汽相变原理协同脱除 PM_{2.5} 的技术分析 [J]. *现代化工*, 2007(11) :23-26, 28.
YANG Linjun, ZHANG Xia, et al. Analysis of cooperative removal of PM_{2.5} by heterogeneous condensation in wet flue gas desulphurization [J]. *Modern Chemical Industry*, 2007(11) :23-26, 28.
- [65] 熊桂龙,杨林军,颜金培,等. 应用蒸汽相变脱除燃煤湿法脱硫净烟气中细颗粒物 [J]. *化工学报*, 2011, 62(10) :2932-2938.
XIONG Guilong, YANG Linjun, YAN Jinpei, et al. Removal of fine particles by heterogeneous condensation from wet-process desulfurized flue gas [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2011, 62(10) :2932-2938.
- [66] HOFFMANN T L, KOOPMANN G H. Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration; Theory and experiments [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 101(6) :210-224.
- [67] DAIN Y, FICHMAN M, GUTFINGER C, et al. Dynamics of suspended particles in a two-dimensional high-frequency sonic field [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1995, 26(4) :575-594.
- [68] HOFFMANN T L, CHEN W, KOOPMANN G H, et al. Experimental and numerical analysis of bimodal acoustic agglomeration [J]. *Journal of Vibration & Acoustics*, 1993, 115(3) :232-240.
- [69] TIWARY R, REETHOF G. Numerical simulation of acoustic agglomeration and experimental verification [J]. *Journal of Vibration*

- & Acoustics, 1987, 109(2):185.
- [70] GALLEGO-JUÁREZ J A, SARABIA R F D, RODRIGUEZ-CORRAL G, et al. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(21):3843-3849.
- [71] 张光学, 张丽丽, 刘建忠. $PM_{2.5}$ 颗粒声波团聚控制技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHANG Guangxue, ZHANG Lili, LIU Jianzhong. Acoustic agglomeration technology for control of $PM_{2.5}$ [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [72] 张光学, 刘建忠, 周俊虎, 等. 频率对燃煤飞灰声波团聚影响的模型及实验验证 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(17):97-102.
ZHANG Guangxue, LIU Jianzhong, ZHOU Junhu, et al. A theoretical model and experimental verification on the influence of frequency on acoustic agglomeration of coal-fired fly ash [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(17):97-102.
- [73] 张光学, 马振方, 吴林陶, 等. 超细液滴气溶胶声波团聚的实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(2):608-615.
ZHANG Guangxue, MA Zhenfang, WU Lintao, et al. Experimental study on acoustic agglomeration of fine droplet aerosol [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(2):608-615.
- [74] 宋文浩, 王松江, 李国智. 外场作用强化细颗粒物团聚除尘技术研究现状与展望 [J]. *环境工程*, 2019, 37(5):150-154.
SONG Wenhao, WANG Songjiang, LI Guozhi. Research status and prospect of technologies of strengthening fine particle agglomeration under extra-fields [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(5):150-154.
- [75] 崔占忠, 龙辉, 龙正伟, 等. 低低温高效烟气处理技术特点及其在中国的应用前景 [J]. *动力工程学报*, 2012, 32(2):152-158.
CUI Zhanzhong, LONG Hui, LONG Zhengwei, et al. Technical features of lower temperature high efficiency flue gas treatment system and its application prospects in China [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2012, 32(2):152-158.
- [76] 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, 4515.
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 CSEE*, 2016, 36(16):4326-4332, 4515.
- [77] WANG Chao, LIU Xiaowei, LI Dong, et al. Measurement of particulate matter and trace elements from a coal-fired power plant with electrostatic precipitators equipped the low temperature economizer [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35:2793-2800.
- [78] 胡建强. 低低温电除尘技术实验研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
HU Jianqiang. Experimental study on electric precipitation technology with low-low temperature [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [79] WANG Quanying, ZHANG Lian, SATO A, et al. Effects of coal blending on the reduction of PM_{10} during high-temperature combustion 1. Mineral transformations [J]. *Fuel*, 2008, 87(13/14):2997-3005.
- [80] ZHOU Ke, XU Minghou, YU Dunxi, et al. The effects of coal blending on the formation and properties of particulate matter during combustion [J]. *Chinese Ence Bulletin*, 2010, 30:3448-3455.
- [81] 徐少波, 曾宪鹏, 于敦喜, 等. 基于大型电厂配煤方案的颗粒物生成实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(3):684-689.
XU Shaobo, ZENG Xianpeng, YU Dunxi, et al. Experimental investigation on particle formation in combustion of coal blends based on a large-scale power plant scheme [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(3):684-689.
- [82] 张平安. 矿物特性对燃煤细颗粒生成与控制的影响研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
ZHANG Ping'an. Effects of mineral properties on fine particulate matter formation and control during coal combustion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [83] XU Yishu, LIU Xiaowei, WANG Hao, et al. Influences of in-furnace kaolin addition on the formation and emission characteristics of $PM_{2.5}$ in a 1 000 MW coal-fired power station [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52:8718-8724.
- [84] CHEN Juan, YAO Hong, ZHANG Ping'an, et al. Control of PM_{10} by kaolin or limestone during O_2/CO_2 pulverized coal combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33:2837-2843.
- [85] NINOMIYA Y, WANG Quanying, XU Shuyin, et al. Effect of additives on the reduction of $PM_{2.5}$ emissions during pulverized coal combustion [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(7):3412-3417.
- [86] XU Yishu, LIU Xiaowei, ZHANG Yang, et al. A novel Ti-based sorbent for reducing ultrafine particulate matter formation during coal combustion [J]. *Fuel*, 2017, 193:72-80.
- [87] SI Junping, LIU Xiaowei, XU Minghou, et al. Effect of kaolin additive on $PM_{2.5}$ reduction during pulverized coal combustion: Importance of sodium and its occurrence in coal [J]. *Applied Energy*, 2014, 114:434-444.
- [88] SUN Wei, LIU Xiaowei, XU Yishu, et al. Effects of the modified kaolin sorbents on the reduction of ultrafine particulate matter ($PM_{0.2}$) emissions during pulverized coal combustion [J]. *Fuel*, 2018, 215:153-160.