

燃煤锅炉烟气脱硫技术对颗粒物排放影响研究进展

王建朋^{1,2,3}, 段璐^{1,2,3}, 王乃继^{1,2,3}, 李杰⁴

(1. 煤科院节能技术有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013; 4. 山东济南热力集团有限公司, 山东 济南 250011)

摘要:随着环境问题的日益严峻及燃煤锅炉超低排放工作的实施,由燃煤引起的大气污染问题及脱硫和除尘设备协同脱除污染物的作用逐渐受到关注。由燃煤释放的 SO_2 和颗粒物对人类健康及自然环境造成严重危害,因此对 SO_2 和颗粒物的治理至关重要。笔者综述了湿法烟气脱硫技术如石灰石-石膏法、氨法等,半干法烟气脱硫技术如循环流化床烟气脱硫技术(CFB)、高倍率灰钙循环烟气脱硫(NGD)等以及干法烟气脱硫技术如电子射线辐射法脱硫技术、活性炭(活性焦、活性半焦)吸附脱硫技术等的发展历史、技术特点及适用范围,并对比分析了各脱硫技术对颗粒物排放特性的影响。结果表明,湿法烟气脱硫技术 SO_2 脱除效率最高,尤其是石灰石-石膏法烟气脱硫技术,总效率可达 99% 以上。入口颗粒物浓度高于 5 mg/m^3 时,此技术能够协同脱除烟气中的颗粒物,除尘效率可达 50%~80%,脱硫前后粒径分布都为典型的双峰分布,且脱硫后粒径峰值向小粒径偏移,硫酸盐成分增加;入口颗粒物质量浓度低于 5 mg/m^3 时,出口颗粒物浓度可能出现不降反增的现象,另外,由于其投资和运行成本高,多应用于大型燃煤机组和脱硫剂来源丰富的地区,同时湿法烟气脱硫产物还具有一定的经济效益;半干法和干法烟气脱硫技术 SO_2 脱除效率在 60%~90%,与湿法脱硫技术相比具有投资和运行成本低,占地面积小和节约水资源等优点,在中小型锅炉领域如燃煤工业锅炉具有较好的应用前景,但大量脱硫产物和脱硫剂随烟气进入除尘设备,浓度高达 1000 g/m^3 以上,为除尘设备造成极大的运行压力,加大了投资和运行成本。目前半干法烟气脱硫技术及干法烟气脱硫技术对颗粒物排放特性的影响研究较少,还需在脱硫系统对颗粒物粒径、成分及形貌特性等方面的影响规律做进一步研究。

关键词:烟气脱硫;颗粒物;超低排放;协同脱除;燃煤锅炉

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2020)02-0034-09

Research progress on the effect of flue gas desulfurization technology of coal-fired boiler on particulate matter emission

WANG Jianpeng^{1,2,3}, DUAN Lu^{1,2,3}, WANG Naiji^{1,2,3}, LI Jie⁴

(1. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China; 4. Jinan Heating Group Co., Ltd., Jinan 250011, China)

Abstract: During the increasingly serious environmental problems and the ultra-low emission implementation of coal-fired boiler, the air pollution problems caused by coal combustion and the combined effect of the flue gas desulfurization (FGD) and dust removal equipment to remove pollutants gradually has been drawn great attention. The SO_2 and particulate matter released from coal combustion cause serious harm to human health and the natural environment, and it is of vital importance to control the SO_2 and particulate matter. In this paper, the development history, technical characteristics and scope of application of the wet FGD technology such as Limestone-gypsum method, ammonia method and so on, semi-dry FGD technology such as circulating fluidized bed flue gas desulfurization technology, No Gap Desul-

收稿日期:2020-02-28;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20022804

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51906095);中国煤炭科工集团有限公司国际合作项目(2019-TD-2-CXY003)

作者简介:王建朋(1994—),男,河南洛阳人,硕士,从事烟气污染物控制研究。E-mail:wjp3930@163.com

引用格式:王建朋,段璐,王乃继,等.燃煤锅炉烟气脱硫技术对颗粒物排放影响研究进展[J].洁净煤技术,2020,26(2):34-42.

WANG Jianpeng, DUAN Lu, WANG Naiji, et al. Research progress on the effect of flue gas desulfurization technology of coal-fired boiler on particulate matter emission[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 34-42.



移动阅读

phurization technology and so on, and dry FGD technology such as Electron ray radiation desulfurization technology, activated carbon (active coke, active semi coke) adsorption desulfurization technology and so on were reviewed. The effect of the FGD system on the emission characteristics of particle was analyzed. The results show that the wet flue gas desulfurization technology has the highest SO₂ removal efficiency, especially the limestone-gypsum flue gas desulfurization technology, and the total efficiency is more than 99%. When the inlet particulate matter concentration is higher than 5 mg/m³, the technology can synergistically remove particulate matter in the flue gas, and the dust removal efficiency can reach 50%–80%. The particle size distribution before and after desulfurization is a typical bimodal distribution, and the peak value of particle size shifts to a small particle size after desulfurization, and the sulfate content increases. When the mass concentration of particulate matter at the inlet is less than 5 mg/m³, the particle concentration at the outlet may increase instead of decreasing. However, due to the disadvantages of high investment and operating cost, it is mostly used in large coal-fired units and areas with rich sources of desulfurizer, and the products of wet flue gas desulfurization also have certain economic benefits. The desulfurization efficiency of the semi-dry and dry FGD is about 60%–90%. Compared with FGD, the semi-dry and dry FGD may have a good prospect in the field of small and medium boilers such as coal-fired industrial boilers due to its low investment and operating costs, small size and water conservation. Thus, a large amount of desulfurization products and desulfurizers enter into the dedusting equipment along with the flue gas, the particle concentration at the inlet of dust removal equipment is higher than 1 000 g/m³, which causes great operating pressure for the dedusting equipment and increases the investment and operating cost. At present, there are few studies on the effects of semi-dry flue gas desulfurization technology and dry flue gas desulfurization technology on the emission characteristics of particulate matter. It is necessary to further study the influence of the desulfurization system on the particle size, composition, and morphology of particulate matter.

Key words: flue gas desulfurization; particulate matter; ultra low emission; synergistic removal; coal-fired boiler

0 引言

煤炭是我国能源消费结构中最主要的组成部分。我国煤炭消费总量的80%以上用于直接燃烧^[1],由燃煤引起的大气污染问题倍受关注。SO₂和颗粒物是目前燃煤烟气污染物控制的两大主要对象,其中SO₂与空气中物质反应产物会对人体、动植物产生巨大危害^[2]。PM_{2.5}是指空气动力学直径小于或等于2.5 μm的颗粒物,也称为可入肺颗粒物,由于其粒径小,孔结构复杂,比表面积大,黏附性强,容易富集多环芳烃、细菌和病毒等有毒有害物质,可进入人体肺泡和血液中,危害人类健康^[3-4],由于其不易沉降,长期漂浮在空气中^[5],造成能见度下降、雾霾等环境问题^[6]。

我国2014年针对火电行业发布了《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》^[7],并于2018年针对燃煤工业锅炉领域发布了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》^[8]。随着烟气污染物超低排放工作的推进,对SO₂和颗粒物形成了2种主要控制路线:除尘系统+湿法脱硫和半干法/干法脱硫+除尘系统。燃煤电厂主要采用前者,普遍为静电除尘器+石灰石-石膏法湿法脱硫,传统的静电除尘器对大粒径颗粒物有较好的脱除效果,但粒径0.1~1.0 μm的粉尘难以荷电,脱除效果较差,逃逸颗粒进入湿法脱硫系统,部分颗粒被液滴捕集,同时少量的脱硫产物随烟气逸出,造成颗粒物物理、化学特性以及浓度发生变化。燃煤工业锅炉主要采用后者,经

过省煤器的烟气直接进入半干法/干法脱硫系统,脱硫剂与脱硫产物随烟气流流出脱硫塔,造成出口处颗粒物的成分、粒径和浓度等性质发生变化,影响后续除尘设备的运行。因此脱硫对除尘设备的运行和颗粒物的排放有重大影响,研究脱硫技术以及脱硫协同控制颗粒物的排放技术逐渐受到关注。本文将分别综述湿法、半干法和干法烟气脱硫技术的原理和发展现状,并分析各脱硫技术对颗粒物排放特性的影响。

1 湿法烟气脱硫技术对颗粒物排放的影响

1.1 湿法烟气脱硫技术发展

湿法烟气脱硫技术(wet flue gas desulfurization, WFGD)是当今世界上应用最广泛且行之有效的燃煤烟气脱硫技术,1927年英国^[9]首次采用石灰石脱硫工艺。三菱重工于1964年研制成功了第1代脱硫装置;美国阿西布朗勃法瑞(ABB)公司设计生产并于1968年在美国投运了第1套脱硫系统;1977年,第1台石灰石-石膏法示范装置在欧洲成功建成并投产。石灰石-石膏法烟气脱硫技术在应用过程中出现了严重的结垢、堵塞和设备材料腐蚀问题,随后双碱法、湿法氧化镁法、碱基洗涤、柠檬酸盐溶液洗涤、Wellman-Lord法、海水法等WFGD应运而生^[10]。迄今为止,WFGD已经相当成熟并广泛应用。目前,世界各国现有的烟气脱硫技术中湿法平均占比约85%,其中以湿法为主的美、日、德3国分别占比约92%、98%和90%^[11]。

几种常见的WFGD的特点及适用范围见表1。

表1 常用WFGD技术^[13-17]
Table 1 Common WFGD technologies^[13-17]

脱硫方法(脱硫剂)	脱硫效率/%	优点	缺点	适用范围
石灰石-石膏法 (石灰石浆液)	≥99	脱硫效率高、吸收剂利用率高、设备运转率高、工作的可靠性高;脱硫剂来源广、价格低廉;脱硫副产物可利用,经济效益显著	小规模系统石膏纯度不高难利用;酸性废液需另行处理;系统复杂且设备存在堵塞、腐蚀问题;对锅炉负荷变化的适应性强	不限
氨法(氨水、液氨或尿素)	≥95	接触面积大,脱硫效率高,副产物能再利用,可增值,技术成熟且运行可靠,运行费用低;烟气条件适应性强;脱硫剂来源稳定;无废水废渣,投资少	氨易挥发,氨逃逸使吸收剂消耗量增加、产生二次污染;亚硝酸盐氧化效率低;设备易腐蚀;系统工艺流程复杂、操作繁琐、占地面积大	不限
双碱法(Na ₂ CO ₃ /NaOH+石灰)	≥95	吸收效率高;在脱硫塔外进行沉淀反应,有效避免脱硫塔的堵塞和磨损;运行可靠,降低了操作费用	钙基脱硫剂不可避免要进入吸收塔循环,造成堵塞问题及腐蚀问题;需另加一道程序,增加了投资费用;产物存在Na ₂ SO ₃ ,降低了石膏品质	不限
氧化镁法 (MgO)	≥95	脱硫剂原料来源充足;运行可靠,脱硫效率高,投资费用少,运行费用低	脱硫产物多采用抛弃法,造成环境污染和资源浪费;相比较石灰石-石膏法,镁法吸收剂费用较高	适用于镁矿丰富地区
海水法 (海水)	≥90	利用海水的碱性,可节约淡水资源;脱硫效率高,一般可达90%以上;不产生副产品和废弃物,无二次污染;系统利用率高;技术成熟,工艺简单,维护方便,投资、运行费用低	受地理位置限制;只适用于低硫煤种;脱硫后海水对环境的影响尚不明确	适用于沿海地区; 适用于含硫量低的煤种
磷铵肥法 (天然磷矿石和氨)	≥95	脱硫剂的原料来源丰富,价廉易得;所获产品为农业急需的磷铵复合肥,具有一定的经济效益	在后续磷铵加工时会产生磷石膏废渣和含氟废气等,需进行处理	磷矿石丰富地区

表1中的WFGD都具有较高的脱硫效率,最高可达99%以上,且系统运行可靠、技术成熟、对煤种和运行工况适应能力强,脱硫剂来源广泛且相对廉价,大多脱硫产物具有一定的经济效益,减少了环境的二次污染,因此,WFGD占全球燃煤锅炉脱硫系统市场的90%以上^[12]。对于不同地区不同工况,设计者需根据不同技术的优缺点结合当地实际情况,选择最佳的脱硫技术。

1.2 WFGD对颗粒物排放的影响

WFGD一般设置在除尘器后,入口总颗粒物质量浓度较低,细颗粒物数浓度较高。近年来,国内外学者逐渐开始关注WFGD在高效脱除SO₂的同时对颗粒物排放特性的影响。Nielsen等^[18]通过现场测量2个燃煤电厂颗粒物的生成和排放特性,发现石灰石-石膏法脱硫对总颗粒物质量脱除效率可达50%~80%,WFGD出口总颗粒物质量浓度约10 mg/m³,其中PM_{2.5}质量占总颗粒物质量的50%~80%,PM₁质量占总颗粒物质量的20%~40%。Meij等^[19]研究发现,经WFGD后,烟气中颗粒物质量浓度由入口处的约100 mg/m³下降到出口处的10 mg/m³以下。Du等^[20]发现脱硫过程对PM_{2.5}细

颗粒物有较好的脱除效果。

国内的研究更为透彻。魏宏鸽等^[21]测试了WFGD的除尘效率,发现入口粉尘浓度低于50 mg/m³时,除尘效率较低,随着入口粉尘浓度增加,WFGD除尘效率提高,当入口粉尘浓度超过200 mg/m³时,WFGD除尘效率高于60%。王琿等^[22]对广东某电厂一台300 MW亚临界自然循环燃煤锅炉100%和70%两种负荷下WFGD系统前后的颗粒物特性进行了测试,发现颗粒物浓度减少了63.0%~75.3%,颗粒粒径分布具有变小的趋势,其中存在约7.9%的石膏颗粒和47.5%的石灰石颗粒。陈浩等^[23]对浙江某200 MW锅炉机组100%和80%两种负荷下的WFGD系统前后的颗粒物特性进行测试,得到颗粒物的平均脱除效率为46.8%,通过SEM-EDS分析比较发现颗粒物凝结团聚形成不规则的絮凝状颗粒物,其中Ca元素含量增多。鲍静静等^[24]通过实验室研究及南京某热电厂的现场测试分析,得到了相似的结论。

部分学者测得WFGD进出口颗粒物粒径分布、颗粒物浓度及总尘的脱除效率如图1所示。由图1(a)可知,脱硫前后粒径分布都为典型的双峰分布,

且脱硫后粒径峰值向小粒径偏移。由图 1(b)可知,FGD 入口处颗粒物总质量浓度最高约为 183.62 mg/m³,最低约为 1.3 mg/m³,这种差异主要由燃煤锅炉机组的负荷、煤种、脱硝方式以及除尘方式等不同而引起。经过 WFGD 后颗粒物的总浓度、粒径分布、化学特性以及形貌特征都发生变化,WFGD 对颗粒物的脱除效率在 50%~80%。入口颗粒物质量浓度大约小于 5 mg/m³时,出口颗粒物浓度可能出现不降反增的现象,主要是因为脱硫过程中浆液夹带、冷却结晶等现象引起的脱硫产物溢出 WFGD,而通过前文对脱硫前后颗粒物的元素含量、成分及外貌特征变化等比较分析,可以明确 WFGD 过程对颗粒物排放控制具有一定的促进作用。

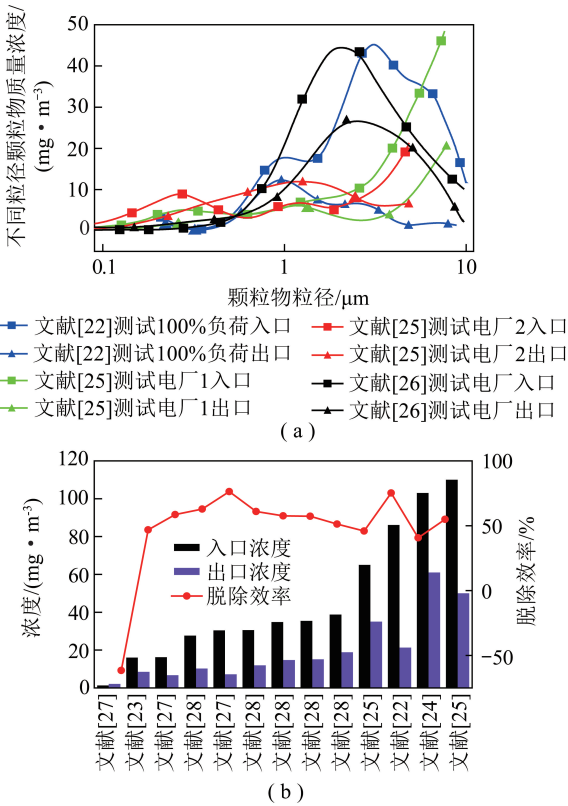


图1 部分文献测得 WFGD 进出口颗粒物特性

Fig.1 Particle characteristics measured by some documents at the import and export of WFGD

国内外学者对 WFGD 系统协同脱除颗粒物的作用机理进行大量研究。潘丹萍^[29]研究石灰石-石膏湿法脱硫过程中细颗粒物转化机制,提出脱硫浆液的洗涤作用可协同脱除烟气中的部分细颗粒物,石灰石-石膏湿法烟气脱硫过程中形成的细颗粒物主要源于脱硫浆液液滴夹带。王翱等^[30-31]研究了单液滴捕集细颗粒物的行为与机制,建立了单液滴捕集颗粒物模型,并采用数值模拟的方法计算发现,

对脱硫塔环境下亚微米颗粒物的捕集泳力作用强于惯性作用。岳焕玲等^[32]分析了 WFGD 系统除尘机制,主要由惯性碰撞、截留和布朗扩散 3 种作用机理综合作用。因此,WFGD 协同脱除颗粒物的过程及机理为:WFGD 喷洒大量脱硫浆液,通过布朗扩散、惯性碰撞、惯性拦截和热泳力的作用捕捉烟气中的颗粒物,含尘液滴在重力作用下进入循环槽,达到协同脱除颗粒物的作用,其作用过程如图 2 所示。

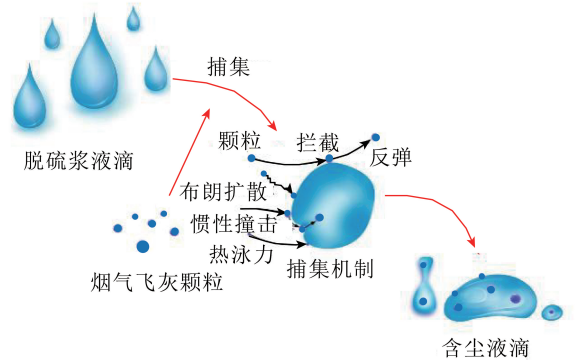


图2 液滴捕集细颗粒物过程

Fig.2 Process of fine particles collection by droplets

WFGD 不仅能满足 SO₂ 的超低排放要求,还能通过脱硫浆液惯性捕集作用^[33],将从主体除尘设备中逃逸的飞灰颗粒物进行深度过滤,但大部分飞灰颗粒物脱除仍依赖主体除尘设备。WFGD 喷淋浆液会携带部分飞灰颗粒物进入脱硫产物中,影响脱硫产物品质。脱硫产物附着在颗粒物表面随烟气排出,造成后续颗粒物理化性质更复杂,对除尘技术要求更高。所以需重点关注主体除尘技术的改造升级来满足排放要求,而 WFGD 对颗粒物脱除的促进效果可做辅助功能。

2 半干法烟气脱硫技术对颗粒物排放的影响

2.1 半干法烟气脱硫技术发展

半干法烟气脱硫技术(以下简称为半干法 FGD)相比 WFGD 出现较晚,发展相对缓慢。20 世纪 70 年代中末期,美国 JOY 公司和丹麦 NIRO 公司联合开发了旋转喷雾干燥法(SDA)烟气脱硫技术^[34],开启了半干法 FGD 的发展篇章。20 世纪 80 年代末,芬兰坦佩拉动力公司(Tampella)开发的炉内喷钙脱硫尾部增湿活化法(LEFAC)烟气脱硫技术和德国 Lurgi 公司开发的循环流化床烟气脱硫技术(CFB-FGD)等半干法 FGD,促使烟气脱硫技术进一步发展。国内利用半干法 FGD 的典型案例有:西南电力设计院等开发了喷雾干燥法并成功应用于四

川白马电厂,脱硫率大于80%,每年可减排SO₂约3 300 t^[11];煤科院节能技术有限公司开发了高倍率灰钙循环(NGD)脱硫技术^[35],成功应用于神东地区20多台煤粉工业锅炉,脱硫效率可达95%以上。此外,半干法FGD还包括烟气悬浮(GSA),增湿灰循环(NID)等技术。几种具有代表性的半干法FGD技术见表2。

半干法FGD结合了WFGD和干法FGD的优点,脱硫反应过程中有少量水参与,脱硫剂和脱硫产物均为半干半湿状态,能够显著节约用水且有效避

免了废水处理问题,相对于WFGD,半干法烟气脱硫技术烟气含湿量低,无需在烟囱前增设烟气再热装置,从而降低了投资及运行成本。脱硫剂一般为碱性物质,可有效脱除烟气中的酸性物质,整个装置占地面积较小、操作费用低。但半干法FGD脱硫效率比WFGD低,长期运行可靠性降低,多适用于低硫煤燃烧后的烟气处理等,因此比较适合中小型燃煤工业锅炉的烟气脱硫,可有效替代WFGD在烟气脱硫中的地位,另外我国西北地区水资源匮乏,更有利于半干法FGD的推广及应用。

表2 常用半干法FGD技术

Table 2 Common semi dry FGD technology

脱硫方法及吸收剂	脱硫效率/%	优点	缺点	适用范围
喷雾干燥法(SDA):石灰浆	80~95	工艺流程简单,便于操作;负荷跟踪特性好;脱硫效率高,能耗低;投资低;脱硫产物为干态易处理,无废水排放	塔壁及塔底容易积灰、腐蚀;存在喷雾器易磨损,管道易堵塞问题	—
循环流化床烟气脱硫技术(CFB):消石灰或消石灰浆	≥90	脱硫效率高,适应范围广;吸收剂利用率较高;占地小,投资及维修费用较低;启停方便,负荷跟踪特性好,可在30%负荷时投用;无污水排放,烟气可不加热;可脱除SO ₃ 、氯化物和氟化物,对现有烟囱腐蚀小	易堵塞;脱硫灰利用附加值低;很难流化碳类粒子且运行不稳定	多用于燃用中低硫煤的中小型机组
烟气悬浮烟气脱硫工艺(GSA):氢氧化钙浆液	≥90	脱硫效率高;负荷适应性强;与除尘器的配套性好;除脱硫外还具有脱除HCl、HF、二噁英、重金属的功能;系统结构紧凑,占地面积小	循环灰量大,除尘系统和脱硫灰再循环系统设备大,能耗高;反应负荷高,对反应器壁冲刷严重,必须采用耐腐蚀金属材料,成本高	低硫煤;适用于垃圾焚烧,钢厂,化肥厂等烟气处理
增湿灰循环脱硫技术(NID):石灰或熟石灰	90~95	负荷跟踪性好,系统运行可靠;工艺流程简单;耗水量少;占地面积小、一次性投资费用低;脱硫产物呈干态、无废水排放;可脱除部分重金属	循环灰通过流化底仓、输送管道、混合器才能进入反应器,在这些中间设备内,大量的石灰粉、循环灰和水易造成堵塞	—
高倍率灰钙循环烟气脱硫(NGD):粉煤灰	85~90	脱硫效率高,工艺简单,易操作;系统紧凑,占地面积小;循环利用粉煤灰,变废为宝	—	适用于粉煤灰钙基化合物含量高的煤种
炉内喷钙脱硫尾部增湿活化法(LIFAC):石灰石粉	60~85	工艺结构简单,占地少,设备少	脱硫效率较低;与增湿活化器中大量飞灰与脱硫剂抢水,水钙摩尔比很低,脱硫剂利用率不高	只适用含硫量0.6%~2.5%的中低硫煤粉锅炉

2.2 半干法FGD对颗粒物排放的影响

由于半干法FGD脱硫剂为半干半湿状态,半干法FGD脱硫系统对颗粒物排放特性的影响与WFGD系统有明显差异。根据半干法FGD脱除烟气中初始排放的颗粒物、未反应的脱硫剂以及脱硫产物随烟气排出脱硫塔,烟气中颗粒物浓度急剧增加,极大增加了后续除尘装置的运行负荷。蒋振华等^[36]研究了半干法FGD应用蒸汽相变促进颗粒物

凝结长大技术,为其在半干法FGD脱硫系统对颗粒物排放特性的影响提供理论参考。刘锦辉等^[37]利用喷雾干燥烟气脱硫系统进行蒸汽相变促进细颗粒脱除试验,结果显示蒸汽相变可促进细颗粒脱除,脱除效率随蒸汽添加量增加而提高。赵旭东等^[38]分析了75 t/h循环流化床烟气脱硫装置在不同工况下不同位置的颗粒物特性,发现脱硫产物只是附着在颗粒物局部且结构疏松,并不是通常所说的密实

覆盖在新鲜脱硫剂表面,随着颗粒循环,粒径不断增加,当颗粒增大到一定程度时,从落灰口排出塔外,并且大粒径颗粒物更易被后续除尘装置捕集。煤科院对补连塔1号和5号2台20 t/h蒸汽锅炉高倍率灰钙循环(no gap desulphurization,NGD)脱硫技术脱硫除尘效果进行了分析,发现NGD进口粉尘浓度分别为11.4和12.5 g/Nm³,出口粉尘浓度分别为1151.9和1148.6 g/Nm³,粉尘浓度分别上升了101倍和92倍,对后续除尘装置造成很大压力。赵健飞^[39]比较了含湿脱硫灰团聚超细颗粒物的影响作用机制,发现含湿脱硫灰不仅对超细颗粒物具有较好的吸附性能,还对超细颗粒物具备较高的团聚强度。

半干法FGD有利于超细颗粒的团聚,团聚后颗粒物更易被后续除尘设备脱除,降低颗粒物在除尘设备的穿透效率,可增加除尘设备对飞灰颗粒物的除尘效率。但半干法FGD所用到的脱硫剂及脱硫产物会随着高速烟气流脱硫酸塔,改变颗粒物的性质,进入后续除尘设备,增加除尘系统的运行负荷。因此采用半干法FGD时,后续除尘设备的设计需在

计算烟气处理量的同时考虑脱硫设备对除尘设备性能造成的影响。

3 干法烟气脱硫技术对颗粒物排放的影响

3.1 干法烟气脱硫技术发展

干法烟气脱硫技术(简称为干法FGD)应用相对较少。20世纪70年代日本荏原(EBARA)公司提出电子射线辐射法烟气脱硫技术,之后10年,美国、德国、波兰和中国等国家也相继对电子束脱硫工艺进行深入研究。其他较为典型的干法FGD还包括干法喷射脱硫技术,荷电干式吸收剂喷射脱硫系统(CDSI),活性炭、活性焦和活性半焦脱硫干法脱硫技术等。表3为典型的干法FGD技术。

干法FGD的脱硫过程和产物处理过程均在干燥状态下进行,脱硫效率低,反应速度慢,但干法FGD也具有突出优点:过程无废水和废酸排出、设备腐蚀小、烟气净化过程中无明显降温、净化后烟气温度高,利于烟囱排气扩散等。常用干法FGD技术见表3。

表3 常用干法FGD技术^[40-42]

Table 3 Common dry FGD Technology^[40-42]

脱硫方法及脱硫剂	脱硫效率/%	优点	缺点
电子射线辐射法脱硫技术;氨	≥90	同时脱硫脱氮,产生的副产物可用作肥料;工艺流程简单,对烟气成分和烟气量的变化具有较好的适应性和跟踪性,一次投资和运行费用低,无二次污染	耗电率较高;脱硫后副产物捕集较难
荷电干式吸收剂喷射脱硫系统(CDSI)脱硫技术;熟石灰	60~70	投资小、收效大、脱硫工艺简单有效、可靠性强;占地面积小,不会造成二次污染	对脱硫剂要求高,一般的石灰难以满足其使用要求;脱硫效率低,较多的吸收剂未经反应便由电除尘器排出,增加了运行费用;脱硫产物与粉尘一起排出,增加了除尘器的负荷与消耗;
炉内喷钙循环流化床反应器脱硫技术;石灰石	≥90	造价低,运行费用不高	增加NO _x 的生成;加入石灰石对烟气露点温度有很大影响;增加热损失
活性炭(活性焦、活性半焦)吸附脱硫技术;活性炭(活性焦、活性半焦)	≥90	吸附剂价格低廉,且能再生可循环利用;无废水、废渣、废气等二次污染排放,脱硫成本低、脱硫效率高	吸附剂磨损大,产生大量细炭粒;反应设备大,消耗脱硫剂多

3.2 干法FGD对颗粒物排放的影响

干法FGD中吸附脱硫过程和产物处理过程均在干燥状态下进行,且多是依靠物理法吸附SO₂,再通过除尘系统除去脱硫产物。干法FGD或多或少都会改变烟气中颗粒物存在形态以及组成成分。对此,学者们关注了整个过程对颗粒物排放造成的影响。陈亚非^[43]认为CDSI系统有助于小颗粒的脱除,带电的吸收剂粒子将小颗粒吸附在表面,形成较大颗粒,提高了烟气中颗粒物的平均粒径,提高相应除尘设备对亚微米级颗粒的脱除效率。另外,带电

的颗粒物会在袋式除尘器滤袋表面形成松散的灰饼,有利于清灰,但很容易在烟气流作用下造成二次扬尘。

与半干法FGD类似,干法FGD也可以改变不同粒径颗粒物之间作用效果,不同程度地促进除尘设备对飞灰颗粒物的脱除效果。脱硫剂和脱硫产物同样会随烟气进入除尘设备中,造成除尘设备的运行负荷,使运行环境更为复杂。相比WFGD,半干法FGD与干法FGD避免了脱硫废水、石膏雨现象^[44]以及有色烟雨等问题,降低了运行投资,其对颗粒物

协同脱除的促进效果远不如 WFGD。因此,3种技术各有利弊,选取相应脱硫技术时应该遵循因地制宜原则,设计除尘设备时需考虑脱硫技术对颗粒物排放的影响。

4 结语与展望

1)湿法脱硫技术因其脱硫效率可达99.9%以上,且运行稳定,已成为燃煤电厂大型机组的主要选择,在国际市场占有率约为90%,更适用于脱硫剂来源丰富和SO₂排放要求高的地区。半干法、干法脱硫技术因占地面积小、工艺流程简单、建设/运行成本低、避免了脱硫废水二次污染和石膏雨现象等优点,使其在缺水地区以及工业锅炉领域具有较好的应用前景。

2)湿法脱硫塔中大量液滴与烟气中颗粒碰撞团聚,并进入脱硫塔底部循环槽,入口颗粒物浓度高于5 mg/m³时,颗粒物脱除效率可达50%~80%,入口颗粒物浓度小于5 mg/m³时,脱硫过程生成的CaSO₄晶体使脱硫塔出口颗粒物浓度上升。半干法、干法脱硫过程大量脱硫剂及脱硫产物随烟气流出生成,造成烟气颗粒物浓度过高,有时甚至高于1 000 g/m³,对后续除尘造成很大压力。

3)WFGD脱硫效率最高,但存在废水二次污染和石膏雨等问题;干法FGD不存在二次污染,但脱硫效率最低,不能满足目前环保要求;半干法FGD结合了WFGD与干法FGD的优点,且有较高的脱硫效率,避免了脱硫废水二次污染和石膏雨等问题,极大地减少了用水量,在燃煤工业锅炉领域具有较高的经济适用性。在半干法FGD脱硫过程中,脱硫剂、脱硫产物以及烟气中的飞灰颗粒物会随烟气进入后续除尘设备,极大地增加了除尘设备的运行负荷,增加维修及运行成本。因此,脱硫技术对颗粒物排放的影响以及解决SO₂和颗粒物协同脱除的经济性问题是目前的难点之一。进一步优化升级脱硫技术,实现SO₂高效脱除并有助于降低颗粒物排放,将是当下及未来燃煤烟气污染物协同脱除的重要研究方向之一。

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴2019[M].北京:中国统计出版社,2019.
National Bureau of Statistics of People's Republic of China. China statistical yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.

[2] 李瑞萍,王高尚,王安建,等.典型工业化国家SO₂排放影响因素分析及其对中国的启示[J].地球学报,2010,31(5):749-758.

LI Ruiping, WANG Gaoshang, WANG Anjian, et al. Factor analysis of SO₂ emission trend in typical industrialized countries and its revelation to China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(5): 749-758.

[3] III P, ARDEN C. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. Journal of the American Medical Association, 2002, 287(9): 1132-1141.

[4] 杜鹏瑞,杜睿,任伟珊.城市大气颗粒物毒性效应及机制的研究进展[J].中国环境科学,2016,36(9):2815-2827.
DU Pengrui, DU Rui, REN Weishan. Research progress on toxicological characteristics and mechanisms of urban atmospheric particulate matters [J]. China Environmental Science, 2016, 36(9): 2815-2827.

[5] 贺克斌.大气颗粒物与区域复合污染[M].北京:科学出版社,2011.
HE Kebin. Atmospheric particulate matter and regional composite pollution [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[6] TWOMEY S. Pollution and the planetary albedo [J]. Atmospheric Environment, 1974, 41(12): 1251-1256.

[7] 环保部、国家发改委、国家能源局.关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知[EB/OL].(2015-12-11). http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm.

[8] 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知[EB/OL].(2018-07-03). http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm.

[9] 朗林茂,张子敬.国内外脱硫技术现状与对比[J].内蒙古科技与经济,2015(10):66-68.
LANG Linmao, ZHANG Zijing. Current situation and comparison of desulfurization technology at home and abroad [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2015(10): 66-68.

[10] 王小明,薛建明,颜俭,等.国内外烟气脱硫技术的发展与现状:燃煤电厂烟气脱硫技术及经验专述之一[J].电力环境保护,2000(1):31-34.
WANG Xiaoming, XUE Jianming, YAN Jian, et al. Development and current situation of flue gas desulfurization technology at home and abroad: One of the special reports on flue gas desulfurization technology and experience of coal-fired power plants [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2000(1): 31-34.

[11] 陈欢哲,何海霞,万亚萌,等.燃煤烟气脱硫技术研究进展[J].无机盐工业,2019,51(5):6-11.
CHEN Huanzhe, HE Haixia, WAN Yameng, et al. Research progress of coal-fired flue gas desulfurization technology [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2019, 51(5): 6-11.

[12] SHI W, LIN C, CHEN W, et al. Environmental effect of current desulfurization technology on fly dust emission in China [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 1-9.

[13] 周军英,汪云岗,钱谊.日本的二氧化硫污染控制对策[J].污染防治技术,1999(1):42-45.
ZHOU Junying, WANG Yungang, QIAN Yi. Countermeasure of sulfur dioxide pollution control in Japan [J]. Pollution Control Technology, 1999(1): 42-45.

- [14] 张慧,齐庆杰,孟璐.石灰石-石膏湿法烟气脱硫在我国电厂的应用[J].能源技术与管理,2007(4):47-49.
ZHANG Hui, QI Qingjie, MENG Lu. Application of limestone-gypsum wet flue gas desulfurization in China's power plants [J]. Energy Technology and Management, 2007 (4): 47-49.
- [15] 姜正雄,魏宇.燃煤电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术概述[J].装备制造,2012(2):60-65.
JIANG Zhengxiong, WEI Yu. Limestone-gypsum wet flue gas desulfurization technology for coal-fired power plants [J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2012(2): 60-65.
- [16] 曹冬梅.我国SO₂污染、危害及控制技术[J].环境科学导刊,2013,32(2):73-74.
CAO Dongmei. Pollution, hazard and control technology of SO₂ in China [J]. Environmental Science Survey, 2013, 32(2): 73-74.
- [17] 郑毓涵.燃煤电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术概述[J].化学工程与装备,2015(1):179-181.
ZHENG Yuhuan. Overview of limestone gypsum wet flue gas desulfurization technology in coal-fired power plant [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015(1): 179-181.
- [18] 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 and Technology, 2002, 174(2): 79-113.
- [19] MEIJ R, WINKEL B H 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): 641-656.
- [20] DU Q, DONG H, LYU D, et al. Field measurements on the generation and emission characteristics of PM_{2.5} generated by utility pulverized coal boiler [J]. Journal of the Energy Institute, 2017, 91(6): 1009-1020.
- [21] 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 efficiency improvement measures of wet desulfurization system [J]. Electric Power, 2015, 48(8): 33-36.
- [22] 王琛,宋蕾,姚强,等.电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物去除作用的实验研究[J].中国电机工程学报,2008,28(5):1-7.
WANG Yan, SONG Qiang, YAO Qiang, et al. Experimental study on removal of fine particles in flue gas by wet desulfurization system in power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 1-7.
- [23] 陈浩,骆仲泐,江建平,等.电厂湿法烟气脱硫颗粒物排放特性的实验研究[J].动力工程学报,2017,37(11):925-930,937.
CHEN Hao, LUO Zhongyong, JIANG Jianping, et al. Experimental study on particulate matter emission characteristics of wet flue gas desulfurization in power plants [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(11): 925-930, 937.
- [24] 鲍静静,刘杭,潘京,等.石灰石-石膏法脱硫烟气PM_{2.5}排放特性[J].热力发电,2014,43(10):1-7.
BAO Jingjing, LIU Hang, PAN Jing, et al. PM_{2.5} emission characteristics of limestone-gypsum desulfurization flue gas [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(10): 1-7.
- [25] 潘丹萍,吴昊,鲍静静,等.电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物及SO₃酸雾脱除作用研究[J].中国电机工程学报,2016,36(16):4356-4362,4519.
PAN Danping, WU Hao, BAO Jingjing, et al. Removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles and SO₃ acid mist from coal-fired power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4356-4362, 4519.
- [26] 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.
- [27] 邓建国,马子珍,李振,等.不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响[J].环境科学,2019,40(8):3457-3462.
DENG Jianguo, MA Zizhen, LI Zhen, et al. Effect of a wet flue gas desulphurization system on the emission of PM_{2.5} from coal-fired power plants [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3457-3462.
- [28] 王东歌,朱法华,易玉萍,等.基于实测的湿法脱硫系统对颗粒物去除效果的研究[J].环境监测管理与技术,2015,27(5):21-24.
WANG Dongge, ZHU Fahua, YI Yuping, et al. Removal efficiency of WFGD system to particles based on field tests [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2015, 27(5): 21-24.
- [29] 潘丹萍.石灰石-石膏湿法脱硫过程中细颗粒物转化机制研究[D].南京:东南大学,2017.
PAN Danping. Study on the conversion mechanism of fine particles in limestone gypsum wet desulfurization process [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [30] 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 particle capture by single drop in desulfurization tower [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(9): 1889-1893.
- [31] 王翱.单液滴捕集细颗粒物的行为与机制研究[D].北京:清华大学,2016.
WANG Ao. Study on the behavior and mechanism of single droplet trapping fine particles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [32] 岳焕玲,原永涛,宏哲.石灰石-石膏湿法烟气脱硫喷淋塔除尘机理分析[J].电力环境保护,2006,22(6):13-15.
YUE Huanling, YUAN Yongtao, HONG Zhe. Analysis of dust removal mechanism of limestone gypsum wet FGD spray tower [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2006, 22(6): 13-15.
- [33] 郝润龙,赵毅,郭天祥.燃煤烟气湿法脱硫系统模型及优化运行[J].动力工程学报,2016,36(10):822-826,841.
HAO Ruilong, ZHAO Yi, GUO Tianxiang. Modeling and operation optimization of wet flue gas desulfurization system [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 822-826, 841.

- [34] 陈俊峰,黄振仁,廖传华.烟气脱硫在我国的发展现状及研究进展[J].电站系统工程,2008,24(4):4-6.
CHEN Junfeng, HUANG Zhenren, LIAO Chuanhua. Development status and research progress of flue gas desulfurization in China [J]. Power System Engineering, 2008, 24(4): 4-6.
- [35] 崔名双,周建明,张鑫,等.半干法脱硫剂的性能及脱硫机理[J].煤炭转化,2019,42(3):55-61.
CUI Mingshuang, ZHOU Jianming, ZHANG Xin, et al. Performance and desulfurization mechanism of semi-dry desulfurizer [J]. Coal Conversion, 2019, 42(3): 55-61.
- [36] 蒋振华,杨林军,鲍静静,等.半干法脱硫中应用蒸汽相变机理协同脱除PM_{2.5}的技术分析[J].现代化工,2008,28(10):68-70.
JIANG Zhenhua, YANG Linjun, BAO Jingjing, et al. Technical analysis of synergistic removal of PM_{2.5} using steam phase change mechanism in semi-dry desulfurization [J]. Modern Chemical Industry, 2008, 28(10): 68-70.
- [37] 刘锦辉,宋士娟,辛成运,等.半干法脱硫中应用蒸汽相变促进细颗粒脱除[J].热能动力工程,2010,25(3):330-334,360-361.
LIU Jinhui, SONG Shijuan, XIN Chengyun, et al. Application of steam phase change in semi-dry desulfurization to promote fine particle removal [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(3): 330-334, 360-361.
- [38] 赵旭东,项光明,姚强,等.干法烟气脱硫固体颗粒物循环特性及微观机理研究[J].中国电机工程学报,2006,26(1):70-76.
ZHAO Xudong, XIANG Guangming, YAO Qiang, et al. Cycling characteristics and micro-mechanism of solid particles in dry flue gas desulfurization [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 70-76.
- [39] 赵健飞.含湿脱硫灰对超细颗粒物团聚效应的研究[J].中国电业(技术版),2015(11):139-141.
ZHAO Jianfei. Study on agglomeration effect of wet desulphurization ash on ultrafine particles [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2015(11): 139-141.
- [40] 高志平.气体悬浮吸收干法脱硫工艺[J].电力环境保护,2001,17(3):54-56.
GAO Zhiping. Dry desulfurization process by gas suspension absorption [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2001, 17(3): 54-56.
- [41] 于军玲,李守信,马双忱.电子束脱硫技术在我国的应用前景[J].电力情报,2001(2):14-16.
YU Junling, LI Shouxin, MA Shuangchen. Application prospects of electron beam desulfurization technology in China [J]. Information on Electric Power, 2001(2): 14-16.
- [42] 邱炜,周刚,付英杰.干法烟气脱硫综述[J].电站系统工程,2005,21(3):19-20.
QIU Wei, ZHOU Gang, FU Yingjie. Summary of dry flue gas desulfurization [J]. Power System Engineering, 2005, 21(3): 19-20.
- [43] 陈亚非.烟气脱硫技术综述(续一)[J].制冷空调与电力机械,2002,23(1):35-37,34.
CHEN Yafei. Overview of flue gas desulfurization technology (Continued 1) [J]. Power Generation & Air Condition, 2002, 23(1): 35-37, 34.
- [44] 翁卫国,张军,李存杰.湿法脱硫系统“石膏雨”问题的成因及解决对策[J].化工进展,2015,34(1):239-244.
WENG Weiguo, ZHANG Jun, LI Cunjie. Origin and solution of the "gypsum rain" problem of limestone-gypsum WFGD system [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(1): 239-244.