

湿法脱硫烟气水回收技术研究进展

马双忱, 别璇, 孙尧, 龚春琴, 曲保忠

(华北电力大学 环境科学与工程系, 河北 保定 071003)

摘要:湿式石灰石石膏法是目前应用最为广泛的烟气脱硫方法,但其涉及的水问题不可忽略,雾霾、白色烟羽、石膏雨等环保问题均与水问题有关。同时烟气中水资源含量大,实现烟气水回收对于电厂节水意义重大。笔者论述了现有烟气中水分来源以及烟气水回收技术,分析了烟气水回收技术的原理、优缺点和研究应用情况等。实现水回收的方法有冷凝法、膜法以及吸收法。冷凝法水回收技术回收的水质较差,具有一定腐蚀性,但水回收量较大;吸收法水回收技术系统较为简单,回收水质也较好,但有吸收溶液随烟气带出的风险;而膜法水回收技术的回收水质好,不涉及污染物排放,但其回收水量仍有提升空间,清理、减小甚至防止污堵是限制该技术发展的关键。电厂须根据实际情况选择具体的冷凝技术,在电除雾器运行状况稳定、除雾效果好的电厂可优先考虑膜法水回收技术;有余热回收需求的电厂,可优先考虑冷凝法。最后指出从根本上解决水问题的方法是转变烟气脱硫方式。干法脱硫由于不涉及废水问题,也不会增加烟气中水蒸气含量,同时避免了腐蚀等问题,是烟气脱硫技术中最有潜力的方法之一。

关键词:湿法脱硫;水回收;干法脱硫;节水;白烟

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)01-0064-07

Research progress on flue gas water recovery technology in wet FGD

MA Shuangchen, BIE Xuan, SUN Yao, GONG Chunqin, QU Baozhong

(Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The wet limestone gypsum method is currently the most widely used flue gas desulfurization method, but the water problems involved are not negligible. Environmental problems such as haze, white plume and gypsum rain are all related to water problems. At the same time, the water content in the flue gas is large, and the realization of flue gas water recovery is of great significance for water saving in power plants. The sources of water in the flue gas and water recycling technology were overviewed, and the principles, advantages and disadvantages, current research and application situation of flue gas water recovery technologies were analyzed. The methods to achieve water recovery includes condensation, membrane and absorption methods. The water quality of water recovery technology using condensation is poor and corrosive, but it has the large amount of water. The system of water recovery technology using absorption is relatively simple, and the water quality is also good, but it has the risk to bring absorption solutions with flue gas together. While the water recycling technology using membrane has good water quality and no pollutant emissions, which is a promising technology, but its recovery water amount still has room for improvement. Cleaning, reducing or even preventing fouling is the key to limiting the development of the technology. Power plants should select specific condensation technology according to the actual situation. Membrane technology can be given priority with stable operation and good defogging effect, and condensation method can be given priority with demand for waste heat recovery in power plants. It is pointed out that the fundamental solution to the water problem is to change the flue gas desulfurization method. Dry desulfurization is one of the most promising methods because of no account of wastewater, no increase in water vapor content in flue gas and avoiding corrosion.

Key words: wet FGD; water recovery; desulfurization using dry method; water saving; white plume

收稿日期: 2018-12-07; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18120704

基金项目: 河北省重点研发计划资助项目(18273708D)

作者简介: 马双忱(1968—),男,辽宁大连人,教授,博士,主要从事燃煤烟气污染控制方面的研究。E-mail: msc1225@163.com

引用格式: 马双忱, 别璇, 孙尧, 等. 湿法脱硫烟气水回收技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 64-70.

MA Shuangchen, BIE Xuan, SUN Yao, et al. Research progress on flue gas water recovery technology in wet FGD[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 64-70.



移动阅读

0 引言

我国是燃煤大国,且短期内不会改变。工信部数据显示,目前煤炭在我国一次能源消费中约占66%,煤炭消费总量约37亿t,占全球煤炭消费量的50%左右。能源利用过程中,全国烟粉尘排放的70%、SO₂排放的85%、NO_x排放的67%都源于煤炭为主的化石能源燃烧^[1]。SO₂环境影响巨大,形成酸雨导致土壤酸化,加速土壤中矿物元素流失,损害人体健康^[2-3]。因此需控制电厂烟气中SO₂排放。石灰石石膏湿法是目前应用最广泛、最成熟的脱硫方法。石灰石石膏湿法脱硫效率高^[4-5],但水污染问题难以解决。2015年4月,我国出台了《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)^[6],国家强化对各类水污染的治理力度,电力行业水环境问题引起关注。脱硫废水存在悬浮物含量高,Ca、Mg硬度大,重金属成分复杂以及高氯离子含量等特征^[7],使其难以彻底处理^[8-9]。同时高湿烟气不利于污染物扩散,极易导致雾霾形成。高湿烟气携带的气溶胶、SO₃等酸性成分还会造成腐蚀问题。天气条件较差温度较低时,会形成石膏雨及有色烟羽^[10],甚至形成雾霾^[11]。较高的大气相对湿度与雾霾的存在、持续密不可分^[12-15]。针对高湿烟气带来的有色烟羽问题,国内部分地区如河北^[16]、天津、上海等地已提出相关政策要求,但针对电厂烟气中可过滤颗粒物以外的可凝结颗粒物和溶解性固体等排放没有相关政策限制,而国外已有相关的检测和排放要求。

电厂烟气水回收技术是控制高湿烟气的有效措施^[17],同时实现节水,以适应环保及政策要求,尤其是我国大部分新建燃煤机组选址在西部产煤缺水地区^[18-19],实行经济有效的节水措施对我国具有重要意义。解决水问题,节约水资源的根本思路是转变污染物控制方式,避免水资源利用量大,具有二次污染的脱硫控制技术,而干法脱硫技术是具有发展前景的方向之一。

1 湿法脱硫的水之困

高湿烟气一方面来源于锅炉中煤燃烧形成的水分,且与煤种密切相关;另一方面来源于湿法脱硫系统,烟气与脱硫浆液接触过程中,由于烟气温度较高,使得浆液中的水雾化带入烟气中,烟气含湿量增加,其带水量随单位耗浆量的增加而增大^[20]。脱硫前后烟气参数变化如图1所示^[21]。脱硫前后烟气中水蒸气体积分数由6%~8%升至11%~13%,水蒸气潜热显著增加,出口烟气中每千克干烟气含湿

量80~100g,一般为饱和甚至过饱和烟气。实际运行中,多方面因素影响造成烟气含湿量增加^[22]。

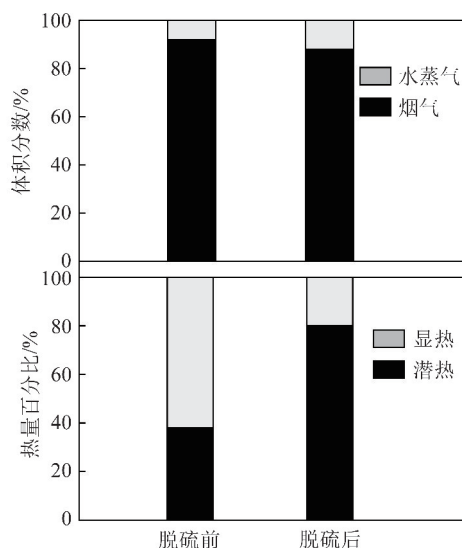


图1 脱硫前后烟气参数变化

Fig. 1 Changes of flue gas parameters before and after desulfurization

以300MW机组为例,脱硫后烟气携带水分超过100t/h。600MW机组的脱硫后烟气中水蒸气含量为200t/h。

从脱硫塔出来的湿烟气,除含有水蒸气外,还带有可过滤颗粒物、可凝结颗粒物以及溶解性固体等^[22],使烟气成分复杂。其中,可过滤颗粒物指燃煤产生的烟尘、脱硫脱硝过程中烟气雾滴中携带的未溶硫酸盐、亚硫酸盐及未反应吸收剂等;可凝结颗粒物在烟道采样位置处为气态,穿透滤膜后在大气中降温凝结为液态或固态颗粒物,主要为SO₃/H₂SO₄等分子态或亚微米级气溶胶态污染物;溶解性固形物为溶于穿透滤膜的细微雾滴中的离子态硫酸盐、亚硫酸盐、氯盐等,离开烟道后在大气中经稀释、干燥、降温、凝结等作用,失去水分变成细颗粒物。石灰石制浆喷入脱硫塔进行脱硫,一般经喷嘴雾化后的石膏颗粒直径在900~3000μm,少量直径在15μm左右^[23],除雾器对直径15μm左右的石膏颗粒基本没有捕集作用。因此这些微细颗粒会带入烟气中。

在原先烟气系统中,由于烟气-烟气再热器(GGH)的存在,排烟温度较高,在80℃左右,烟气抬升高度高,易于扩散,但GGH极易堵塞结垢,且冷热烟气间有漏风问题,造成部分烟气未经脱硫塔处理就进入烟囱排放,影响脱硫效果。2012年,为适应政策变化及减少生产影响,许多企业拆除GGH^[11],排烟温度降低到50℃甚至更低,烟温低于

酸露点时,会发生低温腐蚀。烟气中粉尘易在换热设备表面结垢,在烟囱上升过程中,造成绝热降温,水蒸气进一步冷凝,形成细小水滴($d < 1 \mu\text{m}$),天气条件较差、气压低时,易出现有色烟羽甚至在逆温气象下形成雾霾天气,含有较低浓度的 $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶时常为白色、灰白色烟羽, $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶浓度较高时会对光线产生散射作用形成蓝色烟羽,这些均被称为“有色烟羽”。

除雾器运行条件较差、发生堵塞时^[24],烟气中携带石膏浆液的能力增强,容易发生二次带浆现象,即净烟气带走石膏浆液,加之烟囱冷凝长度不够,雾滴被过多带出,水蒸气过快凝结成较大液滴并在烟囱周围沉降到地面,雾滴干燥后形成白色石膏斑点,产生石膏雨现象。脱硫塔运行情况不佳,如脱硫塔入口烟气分布不均以及烟气在吸收塔内流速较高时,会加重除雾器的不良运行。

2 水资源回收利用方法

2.1 烟气中水分来源

烟气降温与凝结水流量关系如图2所示^[25]。可知针对600 MW机组,烟气温度降低8~10℃,按照回收效率70%计算,可回收烟气凝结水70~90 t/h,回收热量210 GJ/h,可削弱烟气中颗粒物含量。

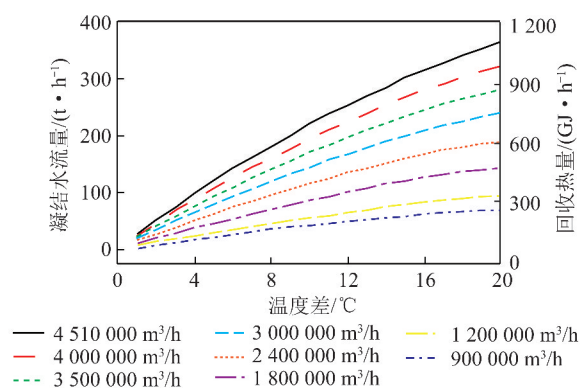


图2 烟气降温与凝结水流量关系

Fig. 2 Relationship between flue gas cooling and condensate flow

随着超低排放改造工程的进一步实施,低低温电除尘、复合塔脱硫以及湿式电除尘等^[26-28]技术对 SO_3 有良好协同脱除效果。其中湿式静电除尘器可有效去除烟气中的石膏雨微液滴,并去除一定量 SO_3 微液滴,脱硫后的饱和烟气在经过高压电场时也会带走部分水分,可在一定程度上降低烟气中总携带水量。低低温省煤器通过对烟气进行预热,可有效提高锅炉效率,降低烟气中水分,而对脱硫塔的优化可增强除雾器对细微颗粒物的脱除效率。这

些技术对颗粒物及水回收有一定贡献,天津市政府针对烟气消白文件明确表示,进行这些改造的电厂可暂缓烟气消白工程。

2.2 烟气水回收技术

目前,实现烟气水回收的技术主要有冷凝法、膜法以及吸收法。

2.2.1 冷凝法水回收技术

冷凝法水回收技术是将脱硫塔后的饱和或过饱和净烟气进行冷凝,一般降温8~10℃,收集水蒸气冷凝形成的小液滴,达到水回收的目的。其冷凝过程分为喷淋冷却技术和间壁换热式冷凝技术。

1) 喷淋冷却技术。采用冷却介质即水与烟气直接接触的方法实现冷却降温。通过新建喷淋塔,烟气在喷淋塔中与冷却水进行充分逆流接触,但该技术无法区分回收水和热媒水。回收水中含有一定量的可溶性盐和气溶胶微粒等,需再处理才能实现冷却水的循环使用,且吸收塔需选择耐腐蚀材质以适应回收水的水质特性。

有学者在脱硫浆液管道增设浆液/水冷凝式换热器,采用冷却水对脱硫浆液进行降温,带走脱硫浆液的热量,降温后的脱硫浆液与烟气在脱硫塔内直接接触,实现 SO_2 脱除的同时达到烟气降温的目的,烟气冷却后的冷凝水回收至脱硫系统水中。这种方法无需建设喷淋冷却塔,由于脱硫过程属于酸碱介质交替过程,脱硫塔会加设防腐层以减小腐蚀,只需另建小型换热器,不会增加整个烟气系统的阻力。

Li等^[29]提出了一种新型烟气深冷方法即FEC-HP方法(图3),可将烟气温度降低到蒸汽露点以下,同时回收潜热,获得洁净水,从而提高能效。该方法采用脱硫装置(FGD)作为深冷换热器。闪蒸和冷凝(FEC)装置以及热泵(HP)用于提供低温介质,如FGD浆液或水用于洗涤和深度冷却烟气,收集回收水并回收废热。

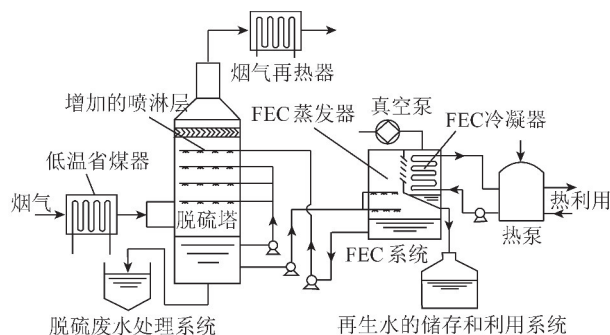


图3 双吸收塔模型过程示意

Fig. 3 Schematic diagram of the double absorption tower model process

但该方法对脱硫系统水平衡影响非常大。一般脱硫系统水蒸发有 3 种途径:石膏带水排出、烟气蒸发以及废水排放。其中最主要的途径是烟气蒸发,冷凝回收的烟气水利用烟气蒸发实现水的外排没有意义,而利用脱硫废水排放实现外排则会增加脱硫废水的处理负担,提高废水处理成本。

2) 间壁式换热技术。该技术通过在脱硫后净烟气管道上新建一个换热器,利用换热器壁面换热实现烟气冷却降温,其冷却媒介有水和气 2 种,冷却媒介与烟气不接触。美国能源部^[25] 2006 年资助的烟气水回收项目表明,水分回收率可达 70%,若能将烟气冷却到环境温度,还可实现 80% 的 Hg 脱除率。雷承勇等^[30] 在烟气水分冷凝回收试验中,实现了冷凝水最大捕集效率 51.57%,但需考虑酸腐蚀及清除潮湿积灰的问题。

为保证足够的换热效率,换热器材质是关键。目前,在燃气的冷凝换热领域,镍-铜-磷涂层材料应用较广泛,而在化工领域最常用的是氟塑料换热器^[31]。借鉴这 2 种思路许多学者进行了相关研究。Levy 等^[25] 对冷凝回收烟气中的水分进行研究,认为水回收率主要与冷却水量及水温相关,综合考虑防腐能力及成本,提出采用 304ss 作为换热器材质。熊英莹等^[32] 通过工况中试试验验证在脱硫塔后加装换热器,可实现露点以下低温烟气的凝水和汽化潜热回收,认为饱和烟气在冷凝过程中的传热系数远大于一般纯气体的对流传热。烟气流速为 6 m/s 时,改性氟塑料换热器总换热系数 $>250 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,换热效果优于金属换热器。国电集团秦皇岛热电有限公司采用氟塑料换热器作为 GGH 的再热段换热器,替代原有的回转式 GGH,江苏国电集团常州电厂 600 MW 机组水媒式气-气换热器烟气再热段也采用氟塑料换热器,布置在脱硫塔与湿式电除尘之间,目前运行稳定,效果较好。这种方法相比于喷淋冷却技术,不会污染冷却水,因此换热后的冷却介质可直接回收使用,但该方法需新增设冷凝式换热器,且换热效果较差;一般情况下,换热器布置在湿法脱硫系统后,烟气中的水以雾滴形式凝结,需加设除雾器保证脱硫效果。

目前,冷凝水的利用有 2 种方式,一是继续提高热量品位以达到供暖或其他利用要求,二是预热锅炉给水,但由于温度限制,供热系数低,加热能力有限。冷凝法回收的水水质较差,需提前处理才可实现进一步利用,处理后冷凝水可用作电厂循环冷却水补水以及脱硫工艺水。熊英莹等^[32] 研究发现烟气温度降低 9~10 $^\circ\text{C}$ 时,回收水分作为脱硫系统补

水可实现脱硫系统零水耗。

2.2.2 膜法水回收技术

美国、欧洲分别在 20 世纪末和 21 世纪初开展了烟气水分捕集技术研究^[33],利用膜的高度选择性对烟气中水蒸气进行选择去除,烟气中其余物质如 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等则被禁止通过膜,这种方法回收水水质好,能量损失小。

欧洲启动的 CAPWA 研究计划主要进行以有机中空纤维膜为核心的水回收技术研究。CAPWA 膜法技术的水回收原理如图 4 所示^[34],利用涂有水分选择性涂层的中空纤维膜实现对水分子的捕集。

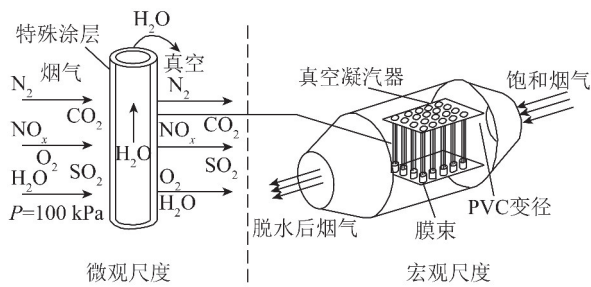


图 4 CAPWA 水捕集原理示意

Fig. 4 Schematic diagram of CAPWA water capture principle

荷兰学者 Hylke 等^[34] 基于 CAPWA 膜法回收烟气中水分,以聚合物膜为分离膜进行了 $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气氛下水分回收研究。膜材料选择了 SPEEK(磺化聚醚醚酮),分析了不同水分活度下 SPEEK 膜对水的选择性和渗透通量的影响,并对渗透系数做了影响因素试验,阐述了中空纤维膜组件的系统工艺。膜分离装置在实际烟气中运行了 5 300 h,系统运行稳定,保持了较高的水分回收率。

美国在能源部的支持下开展了以陶瓷膜技术为核心的水回收技术研究,运输膜凝汽器(TMC)技术的原理示意如图 5 所示^[35]。Bao 等^[36] 利用纳米多孔膜管束制成运输膜冷凝器(TMC)用于回收锅炉烟气中的水蒸气及大量潜热,以提高锅炉效率并节约用水。Wang 等^[35] 应用 TMC 技术研究了烟气中水分回收和余热利用,利用纳米多孔陶瓷膜毛细管冷凝分离机制从烟道气中提取一部分水蒸气及其潜热的废热和水回收技术。回收的水质量高,无矿物质,可用作几乎所有工业过程的补充水。研究结果表明,回收了烟气中 40% 的水分,提高了 5% 的锅炉效率。

国内学者对燃煤电厂烟气中水分回收的研究较少,膜分离技术主要应用在膜法空气脱湿和膜法天然气脱水方面。陈海平等^[37] 对中空纤维膜法回收火电厂烟气中水蒸气进行研究,通过布置 200 万根有效长度 500 mm 的 PEs-SPEEK56 中空纤维膜,

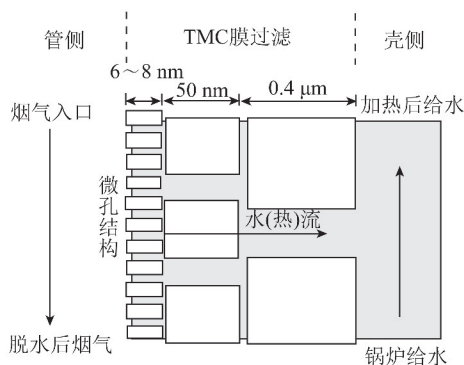


图 5 TMC 模组件工作原理

Fig. 5 Working principle of modular component of TMC

并利用凝汽器提供渗透真空(绝对压力 4 ~ 5 kPa), 预计每小时可回收水 37.9 t, 回收率约为 28.3%, 可使脱硫后烟气中酸露点降低 6.5 °C。1998 年, 中国科学院大连化学物理研究所^[38]自行研制的膜分离器在长庆气田进行了天然气膜法脱水的工业性试验, 并取得成功。

膜法水回收技术的回收水水质高, 但实际对烟气中颗粒物的浓缩过程, 实际进入大气中的颗粒物含量仍需进一步验证。且烟气粉尘、石膏颗粒以及烟气中许多微粒等会黏附在膜上, 造成污堵, 如何清理、减小甚至防止污堵是限制膜应用的关键。

2.2.3 吸收法水回收技术

吸收法水回收技术借鉴于空调行业的冷凝降温抽湿过程, 吸收溶液直接与烟气接触, 依靠烟气中水蒸气分压与吸收集中水蒸气分压的不同获取烟气中水分, 这种方法不需额外对烟气进行加热或冷却, 回收的水质较好。

美国能源部在 2006 年支持了有关液体干燥剂烟气脱水项目^[39], 对液体干燥剂进行筛选, 并以 CaCl_2 作为液体干燥剂, 进行了中试规模测试, 将燃煤锅炉脱硫后的水分降到了 8% ~ 9%。但在吸收溶液与烟气的相互作用以及可能形成的沉淀物等方面仍缺乏研究。

Lars 等^[40]在开式吸收系统中进行了余热回收以及颗粒分离技术研究, 由瑞典国家能源局资助, 其溶液的再生是利用部分锅炉热烟气, 可将出口烟气相对湿度稳定在 38% ~ 45%, 颗粒物脱除 33% ~ 44%。魏璠等^[41]将循环吸收式热泵用于烟气水回收, 以氯化钙溶液作为吸收液, 通过理论建模分析与试验研究, 认为吸收法比冷却水喷淋减湿方法利用率更高。

吸收法水回收技术对烟气温度要求不高, 更易实现发电厂水回收。不需要额外的加热或冷却条件, 理论上对整个系统的压降影响较小, 但溶液有随

烟气外排进入大气的可能, 同时对材料的耐腐蚀性也有更高要求。因此, 针对吸收法进行烟气水回收仍需进一步研究。

3 干法脱硫技术

水回收技术是为了解决湿法脱硫带来的问题, 而如何从根本上解决水问题, 寻求可持续发展, 真正实现清洁高效生产, 是目前脱硫技术的发展方向之一。干法脱硫由于不涉及废水问题, 也不会增加烟气中水蒸气含量, 同时避免了腐蚀等问题, 是烟气脱硫技术中的潜力技术之一^[42-44]。可预见过去脱硫以湿法为主, 未来干法脱硫更流行。美国新增 FGD 大多为干法脱硫, 很少有新的 WFGD 项目, 主要原因是综合考虑废气、废水、固废的治理, 环保要求中增加了污染物治理对象, 大幅提高了减排要求, 如美国新脱硫废水法规对烟气脱硫废水排放限制收严, 脱硫废水处理难度和处理费用进一步提高^[7]。

目前尚在研究的干法脱硫技术按照温度可分为高温干法脱硫技术、中温干法脱硫技术以及低温干法脱硫技术。高温干法脱硫技术对于设备材料要求较高, 一般与锅炉燃烧相结合; 低温技术涉及成本与脱硫效率等问题; 中温条件下由于温区合适可与 SCR 进一步耦合实现多种污染物脱除, 也是干法中备受关注的方法之一^[45-46]。现今多污染物协同控制是烟气净化工艺路线选择的主要趋势, 但是目前干法脱硫效率是制约其发展的关键因素。

4 结 语

湿法脱硫系统涉及的水问题不可忽略, 如何消除排烟后造成的有色烟羽问题, 如何减少脱硫后净烟气中石膏浆液和液态水实现水资源回收是关注的重点。水回收技术中冷凝法回收的水质较差, 有一定的腐蚀性, 但水回收量较大。膜法水回收技术同样可获得较好的回收水质, 同时不涉及污染物排放, 但其回收水量仍有提升空间, 有关污堵问题仍需进一步研究。吸收法水回收技术系统较为简单, 回收水质也较好, 但有吸收溶液随烟气带出的风险。电厂须根据实际情况选择具体的冷凝技术, 在电除雾器运行状况稳定、除雾效果好的电厂可优先考虑膜法水回收技术; 有余热回收需求的电厂, 可优先考虑冷凝法。但实际消除白烟与水回收效果需进一步验证后推广应用。随着社会发展以及人们对健康和环境保护的重视, 环保政策会越来越严格, 实现电厂烟气污染物治理的变革不容忽视, 从源头入手实现根本性改变才是污染物治理最终的发展方式。

参考文献(References):

- [1] 节能与综合利用司. 工业和信息化部 财政部关于联合组织实施工业领域煤炭清洁高效利用行动计划的通知[EB/OL]. (2015-03-09) [2018-12-07]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057542/n3057544/c3607954/content.html>.
- [2] 郝吉明,贺克斌. 中国燃煤二氧化硫污染控制战略[J]. 中国环境科学,1996,16(3):208-212.
HAO Jiming, HE Kebin. Coal-burning SO₂ pollution control strategy in China[J]. China Environmental Science, 1996, 16(3):208-212.
- [3] 王书肖,郝吉明. 燃煤二氧化硫污染控制技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社,2001.
- [4] 温卿云,谢倩,杨西茜,等. 燃煤电厂脱硫除尘超低排放改造措施探讨[J]. 环保科技,2017,23(5):6-10.
WEN Qingyun, XIE Qian, YANG Xiqian, et al. The discussion of ultra-low emissions reform measures for coal-fired power plant desulfurization and dedusting[J]. Environmental Protection and Technology, 2017, 23(5):6-10.
- [5] 薛方明,邵媛. 双塔双循环脱硫技术在执行污染物超低排放火电机中的应用[J]. 山东化工,2015,44(20):147-150.
XUE Fangming, SHAO Yuan. Application of twin towers double circulation desulfurization technology in thermal power units with the implementation of ultra-low pollutant emission[J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(20):147-150.
- [6] 中华人民共和国环境保护部. 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知[EB/OL]. (2015-04-16) [2018-12-07]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm.
- [7] 马双忱,于伟静,贾绍广,等. 燃煤电厂脱硫废水处理技术研究与应用进展[J]. 化工进展,2016,35(1):255-262.
MA Shuangchen, YU Weijing, JIA Shaoguang, et al. Research and application progresses of flue gas desulfurization (FGD) wastewater treatment technologies in coal-fired plants[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(1):255-262.
- [8] CHU P. Technical manual: Guidance for assessing wastewater impacts of FGD scrubbers[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2006.
- [9] 刘海洋,夏怀祥,江澄宇,等. 燃煤电厂湿法脱硫废水处理技术研究进展[J]. 环境工程,2016,34(1):31-35.
LIU Haiyang, XIA Huaixiang, JIANG Chengyu, et al. Research advances in wet flue gas desulfurization waste water treatment technology in coal-fired power plant[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(1):31-35.
- [10] 郭彦鹏,潘丹萍,杨林军. 湿法烟气脱硫中石膏雨的形成及其控制措施[J]. 中国电力,2014,47(3):152-154.
GUO Yanpeng, PAN Danping, YANG Linjun. Formation and control of gypsum rain in wet flue gas desulfurization[J]. Electric Power, 2014, 47(3):152-154.
- [11] 周勇. 雾霾暴发主因:湿法脱硫——基于大数据、气象数据和实验数据的确认[J]. 科学与管理,2017,37(4):15-21.
ZHOU Yong. The main cause of smog outbreak: Wet flue-gas desulfurization based on the big data, meteorological data and experimental data[J]. Science and Management, 2017, 37(4):15-21.
- [12] QING T Y, YAN Y, LING Q, et al. Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing area[J]. China Environmental Science, 2007, 27(5):584-588.
- [13] YIN Z C, WANG H J, GUO W L. Climatic change features of fog and haze in winter over North China and Huang-Huai area[J]. Science China earth Science, 2015, 58(8):1370-1376.
- [14] QUAN J, TIE X, ZHANG Q, et al. Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012-2013 winter in Beijing, China[J]. Atmospheric Environmental, 2014, 88:83-89.
- [15] SARNAT J A, BROWN K W, SCHWARTZ J, et al. Ambient gas concentrations and personal particulate matter exposures[J]. Epidemiology, 2005, 16(3):385-395.
- [16] 河北省大气污染防治工作领导小组办公室. 河北省燃煤电厂深度减排攻坚方案[EB/OL]. (2018-09-20) [2018-12-07]. <https://www.antpedia.com/ns/mip/851950.html>.
- [17] MA Shuangchen, CHAI Jin, JIAO Kunling, et al. Environmental influence and countermeasures for high humidity flue gas discharging from power plants[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 73:225-235.
- [18] 杨宝红. 新形势下火电厂节水减排工作特点及关键[J]. 热力发电, 2016, 45(9):95-99.
YANG Baohong. Features and key process of water saving and wastewater discharge reduction in thermal power plants at current situation[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(9):95-99.
- [19] 甘露,毛霖,李红飞,等. 燃煤烟气水分回收技术概述[J]. 资源节约与环保, 2017(8):24-25.
- [20] 胡满银,汪黎东,冯亚娜,等. 湿式脱硫装置烟气带水的计算与分析[J]. 环境工程, 2002, 20(4):45-47.
HU Manyin, WANG Lidong, FENG Yana, et al. Calculation and analysis of flue gas with water in wet desulfurizer[J]. Environmental Engineering, 2002, 20(4):45-47.
- [21] 田路泞,韩哲楠,董勇,等. 燃煤电厂湿烟气余热及水分回收技术研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(5):105-110.
IAN Luning, HAN Zhe'nan, DONG Yong, et al. Review of water recovering technologies from flue gas in coal fired power plant[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5):105-110.
- [22] NIE P F, ZHANG H Y, WANG Y. Causes analysis of wet flue gas desulphurization stack rainout for the thermal powerplant without GGH and its countermeasures[J]. Advanced Materials Research, 2013, 724/725:1306-1309.
- [23] 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 Process, 2015, 34(1):239-244.
- [24] 高洁. 石灰石湿法烟气脱硫装置除雾器缺陷分析及对策[J]. 河南电力, 2016(7):22-24.
- [25] LEVY E, BILIRGEN H, JEONG K, et al. Recovery of water from boiler flue gas[R]. United States: Office of Research and Sponsored Programs Place of Publication, 2008.

- [26] 姚胜威. 脱硫超低排放技术在电厂中的应用探讨[J]. 机电信息, 2016(15): 84-85.
- [27] 刘鹤忠, 陶秋根. 湿式电除尘器在工程中的应用[J]. 电力勘测设计, 2012(3): 43-47.
LIU Hezhong, TAO Qiugen. Exploration application of wet electric dust catcher to engineering[J]. Electric Power Survey & Design, 2012(3): 43-47.
- [28] 展茂源, 王猛, 邓徐帧, 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 Environmental Protection, 2017, 33(2): 30-33.
- [29] LI Y, YAN M, ZHANG L, et al. Method of flash evaporation and condensation-heat pump for deep cooling of coal-fired power plant flue gas; Latent heat and water recovery[J]. Applied Energy, 2016, 172: 107-117.
- [30] 雷承勇, 王恩禄, 黄晓宇, 等. 燃煤电站烟气水分回收技术试验研究[J]. 锅炉技术, 2011, 42(1): 5-8.
LEI Chengyong, WANG Enze, HUANG Xiaoyu, et al. Experiment study on recovery of water steam in the flue gas of brown coal-fired power plant[J]. Boiler Technology, 2011, 42(1): 5-8.
- [31] 丛晓蓉, 汪洋. 燃煤电站锅炉烟气余热与水分联合回收技术展望与分析[J]. 发电与空调, 2012, 33(2): 26-28.
CONG Xiaorong, WANG Yang. Recovery technology in coal-fired power plant of heat and water from boiler flue gas[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2012, 33(2): 26-28.
- [32] 熊英莹, 谭厚章, 许伟刚, 等. 火电厂烟气潜热和凝结水回收的试验研究[J]. 热力发电, 2015, 44(6): 77-81.
XIONG Yingying, TAN Houzhang, XU Weigang, et al. Experimental study on latent heat and condensate recovery from flue gas in coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(6): 77-81.
- [33] 许全坤, 汪洋. 基于膜分离方法的烟气水分回收技术研究现状及展望[J]. 华电技术, 2013, 35(5): 25-28.
- [34] SIJBESMA H, NYMEIJER K, MARWIJK R V, et al. Flue gas dehydration using polymer membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2008, 313(1/2): 263-276.
- [35] WANG Dexin, BAO Ainan, KUNC Walter, et al. Coal power plant flue gas waste heat and water recovery[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 341-348.
- [36] BAO A, WANG D, LIN C. Nanoporous membrane tube condensing heat transfer enhancement study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 456-462.
- [37] 陈海平, 刘彦达, 周亚男. 中空纤维膜法回收火电厂烟气中水蒸气[J]. 热力发电, 2017, 46(1): 100-111.
CHEN Haiping, LIU Yanda, ZHOU Yanan. Experimental study on recycling water vapor from flue gas of thermal power plants using hollow fiber membrane[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(1): 100-111.
- [38] 董子丰. 气体膜分离技术在石油工业中的应用[J]. 膜科学与技术, 2000, 3(3): 38-43.
- [39] FOLKEDAHL B C, WEBER G F, COLLINGS M E. Water extraction from coal-fired power plant flue gas[R]. Grand Forks: University of North Dakota, 2006.
- [40] WESTERLUND L, HERMANSSON R, FAGERSTRÖM J. Flue gas purification and heat recovery: A biomass fired boiler supplied with an open absorption system[J]. Applied Energy, 2012, 96: 444-450.
- [41] 魏璠, 肖云汉, 张士杰, 等. 喷淋吸收过程模型及实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(10): 1621-1624.
WEI Fan, XIAO Yunhan, ZHANG Shijie, et al. The model and experiment of heat and mass transfer in spraying absorption[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(10): 1621-1624.
- [42] 张方炜. 烟气活性焦干法脱硫工艺及其在电厂中的应用[J]. 电力勘测设计, 2009(3): 34-41.
ZHANG Fangwei. Desulfurized technology of smoke gas active by parch method, applying to power plant[J]. Electric Power Survey & Design, 2009(3): 34-41.
- [43] 赵旭东, 高继慧, 吴少华, 等. 干法、半干法(钙基)烟气脱硫技术研究进展及趋势[J]. 化学工程, 2003, 31(4): 64-68.
ZHAO Xudong, GAO Jihui, WU Shaohua, et al. Development of dry and semi-dry (calcium base) flue gas desulfurization technology[J]. Chemical Engineering, 2003, 31(4): 64-68.
- [44] 马双忱, 别璇, 孙尧, 等. 燃煤电厂镁法脱除烟气中 SO_2 的研究现状与展望[J]. 化工进展, 2018, 37(9): 3609-3617.
MA Shuangchen, BIE Xuan, SUN Yao, et al. Present research situation and prospect of magnesium desulfurization in coal-fired power plant[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(9): 3609-3617.
- [45] BUENO-LÓPEZ A, GARCÍA-GARCÍA A. Combined SO_2 and NO_x removal at moderate temperature by a dual bed of potassium-containing coal-pellets and calcium-containing pellets[J]. Fuel Process Technology, 2005, 86(16): 1745-1759.
- [46] HOU Bo, QI Haiying, YOU Changfu, et al. Dry desulfurization in a circulating fluidized bed (CFB) with chain reactions at moderate temperatures[J]. Energy & Fuels, 2005, 19(1): 73-78.