

研究论文

燃煤电厂白色烟羽消除技术现状与展望

杨晓阳¹, 王飞¹, 杨凤玲¹, 张缠保², 程芳琴¹

(1. 山西大学 国家环境保护煤炭废弃物资源化高效利用技术重点实验室 低附加值煤基资源高值化协同创新中心, 山西 太原 030006;

2. 山西华仁通电力科技有限公司 山西 太原 030006)

摘要:随着我国环保政策愈发完善和严格, 电厂湿法脱硫后饱和湿烟气排入大气形成的“白色烟羽”治理需求增加。通过对白色烟羽形成与消除机理的研究, 分析了目前燃煤电厂消除白色烟羽技术的优缺点及应用前景。国内外现有的消白技术主要包括烟气冷却、烟气加热、冷凝复热、旋流除湿、溶液除湿、膜法除湿等。烟气冷却、烟气加热、冷凝复热技术均通过直接/间接换热, 改变烟气在出口处的状态实现消白, 技术相对成熟, 且已在工程实例中应用, 但能耗大, 对换热设备防腐要求较高, 并且 GGH 成本高、能耗大; 旋流除湿技术虽然负荷大、压降低和结构简单, 但消白效果有限; 溶液除湿与膜法除湿技术目前还处于试验研究阶段, 由于自身技术缺陷, 鲜见应用于燃煤电厂的湿烟气处理工艺中。烟气瞬间加压凝结消白技术利用流场结构瞬间提高水蒸汽分压, 从而使其液化, 同时蒸汽凝结液化释放大量潜热, 提高了烟气出口温度, 烟气除湿与加热协同作用最终保障饱和湿烟气消白。讨论和对比了各治理技术的特点和适应性, 并结合试验, 发现烟气瞬间加压凝结消白技术可有效回收湿烟气中的水蒸汽, 且在蒸汽凝结过程中饱和蒸汽内携带的细颗粒等污染物作为凝结核被凝结液滴协同脱除, 同时无需其他换热设备, 降低了能耗, 是烟气消白技术中的潜力技术之一。

关键词:湿法脱硫; 白色烟羽; 饱和湿烟气; 加压凝结; 细颗粒污染物

中图分类号: TQ53; TK114

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)06-0109-09

Current status and prospect of white moist plume elimination technology in coal-fired power plants

YANG Xiaoyang¹, WANG Fei¹, YANG Fengling¹, ZHANG Chanbao², CHENG Fangqin¹

(1. Collaborative Innovation Center of High Value-Added Utilization of Coal-related Wastes, State Environmental Protection Key

Laboratory of Efficient Utilization Technology of Coal Waste Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi HuaRenTong

Electric Power Technology Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract: With the increasingly complete and strict environmental protection policies in China, the demand for the treatment of "white plumes" formed by the saturated wet flue gas discharged into the atmosphere after wet desulfurization in power plants has increased. Through the research on the formation and elimination mechanism of white plume, the advantages, disadvantages and application prospects of the current technology for eliminating white plume in coal-fired power plants were analyzed. The existing technologies for eliminating white moist plume at home and abroad mainly include flue gas condensation, flue gas heating, condensation reheating, swirling dehumidification, solution absorption, and membrane separation. All of the flue gas cooling, flue gas heating, and condensation reheating technologies use direct/indirect heat exchange to change the state of flue gas at the outlet to achieve whitening. The technology is relatively mature and has been applied in engineering, but it has high energy consumption and high anti-corrosion requirements of heat exchange equipment; GGH has high cost and high energy consumption. Although the cyclone dehumidification technology has a large load, pressure reduction and simple structure, its whitening effect is limited; The technology of solution dehumidification and membrane separation is still in the experimental research stage at present, and it has not been used in the wet flue gas treatment process of coal-fired power plants due to its own

收稿日期: 2019-11-06; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19110606

基金项目: 山西省科技重大专项资助项目(20181102010); 襄垣县固废综合利用科技攻关项目(2018XYSDYY-13)

作者简介: 杨晓阳(1995—), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 研究方向为大气污染控制。E-mail: yllskk@163.com。通讯作者:

程芳琴, 教授, 从事煤洁净燃烧及固废利用方向研究。E-mail: cfangqin@sxu.edu.cn

引用格式: 杨晓阳, 王飞, 杨凤玲, 等. 燃煤电厂白色烟羽消除技术现状与展望[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 109-117.

YANG Xiaoyang, WANG Fei, YANG Fengling, et al. Current status and prospect of white moist plume elimination technology in coal-fired power plants[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 109-117.



移动阅读

technical defects. Instantaneous pressure condensation dehumidification technology of flue gas uses the flow field structure to instantly increase the partial pressure of water vapor, so as to make it liquefied. At the same time, steam condensation and liquefaction will release a lot of latent heat, which can improve the flue gas outlet temperature. The synergistic effect of flue gas dehumidification and heating finally ensures the saturation of wet flue gas white. In this paper, the characteristics and adaptability of various treatment technologies were discussed and compared. Combined with experiments, it is found that the instantaneous pressurized condensation and whitening technology of flue gas can effectively recover the water vapor in the wet flue gas. The fine particles and other pollutants in the saturated steam are removed as condensation nuclei by the condensation droplets during the steam condensation process. At the same time, other heat exchange equipment is not needed, which reduces energy consumption. It is one of the potential technologies in the flue gas whitening technology.

Key words: wet desulfurization; white moist plume; saturated wet flue gas; pressurized condensation; fine particle contaminant

0 引言

我国的能源结构决定了在未来较长的一段时间内煤炭仍然是我国最主要的一次能源。煤炭在我国一次能源消费量中占比达66%，而我国煤炭消费总量占全球煤炭总量的50%^[1]。燃煤过程中产生大量的SO₂，对环境危害巨大，是造成酸雨、土壤酸化及水质污染的主要原因之一。因此国家出台政策，要求燃煤电厂进行“超低排放”改造，烟气中SO₂排放浓度不超过35 mg/Nm³^[2]。石灰石-石膏湿法脱硫技术简单成熟，在我国燃煤电厂脱硫工艺中应用广泛^[3]。该工艺通过石灰石浆液喷淋方式，使石灰石浆液与烟气中的SO₂直接接触反应，从而脱除烟气中的SO₂。由于石灰石湿法脱硫过程为放热反应，故浆液中的部分液态水受热蒸发为水蒸汽，导致烟气湿度接近饱和甚至过饱和^[4-5]。湿烟气通过烟囱排放到大气环境后，由于环境温度较低，湿烟气中的水蒸汽迅速凝结成小液滴，在光折射、散射作用下，烟囱出口的烟羽呈白色，形成白色烟羽^[6-7]。经检测，饱和湿烟气中含有大量水分、可凝结颗粒物和可溶性离子，直接排放不仅造成水资源浪费，且会加重灰霾的形成^[8-10]。针对湿法脱硫后湿烟气排放引起的白色烟羽问题，国内部分省市（如上海、河北、山西、浙江等）相继出台政策，要求通过调节烟气出口温度或湿度来消除烟羽。随着燃煤电厂超低排放改造的推进，白色烟羽将是电厂面临的又一个重大环境问题。若能有效解决湿法脱硫后饱和湿烟气排放形成的白色烟羽问题，不仅能实现电厂近零排放，加速推进灰霾治理，而且还能回收烟气中的水分，预计年节水量可达几十亿吨。

1 白色烟羽形成机理

白色烟羽的形成机理可通过饱和湿烟气的温-湿曲线描述，图1为常压下饱和湿空气温-湿曲线，A点为脱硫塔出口饱和湿烟气状态，此时烟气湿度达到饱和，温度为45~55℃，C点为环境中空气状

态（视天气及冬夏季节变化）。烟气从烟囱排出后与环境空气接触混合，烟气状态从A点沿AB变化到B点，烟气所携带的水蒸汽在该变化过程中凝结成液滴，在光折射和散射作用下，视觉上呈白色或灰色，形成白色烟羽。烟气状态达B点后，继续与环境空气接触混合，此后烟气不再是饱和状态，烟气状态由B点沿BC移动至C点，该变化过程中不再有水蒸汽凝结成液滴^[11-12]。

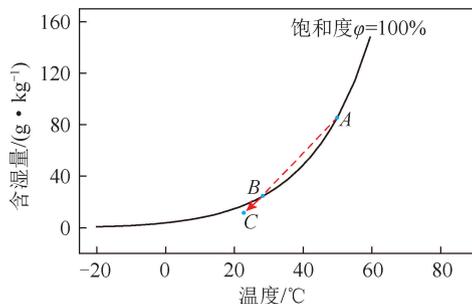


图1 白色烟羽形成机理示意

Fig.1 Schematic diagram of the formation mechanism of whitemoist plume

2 白色烟羽消除技术

根据烟羽形成机理，若消除湿烟羽需在一定程度上改变烟囱出口的烟气状态（温度或湿度），使烟气在排放到大气时不会有小液滴析出，从而避免白色烟羽现象产生。根据改变烟气初始状态的方式，消白技术可分为：①通过换热消除白色烟羽，即在烟气排入大气前，通过加热或冷却烟气改变烟气的状态点（图2），包括烟气冷却技术（路径A—F—C）、烟气加热技术（路径A—B—C或A—G—C）、烟气冷凝复热技术（路径A—D—E—C）等；②其他消白技术，主要有旋流除湿技术、溶液除湿及膜法除湿技术。但目前常用的治理湿烟羽技术主要采用换热方式，第2类技术虽然从原理上有助于消除白色烟羽，但并未针对白色烟羽而制定相关的规范和标准。

2.1 烟气冷却消白技术

烟气冷却消白技术是对湿法脱硫后湿烟气进行

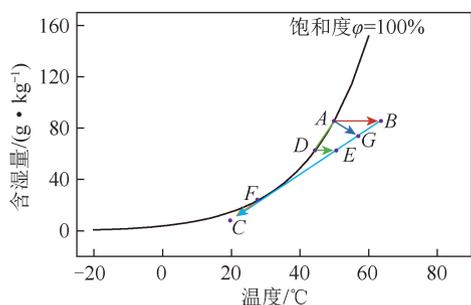


图2 消除白色烟羽换热技术路线示意

Fig.2 Schematic diagram of elimination of white moist plume treatment technology

冷却降温,烟气中的水蒸汽凝结成液滴,使烟气含湿量降低,保证其离开烟囱后在抬升扩散过程中不会形成液滴,从而达到消除白色烟羽的目的。根据烟气与换热介质的接触形式,该技术可分:①采用间壁式冷却换热器,如图3所示;②采用直接接触式冷却换热器,如图4所示。

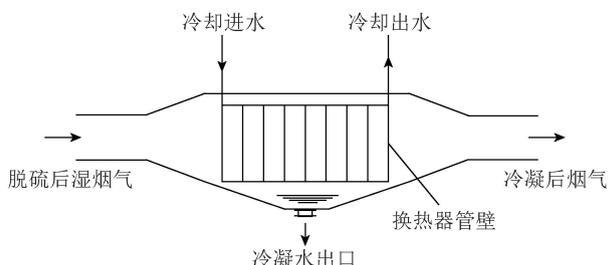


图3 间壁式换热器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the wall-mounted heat exchanger

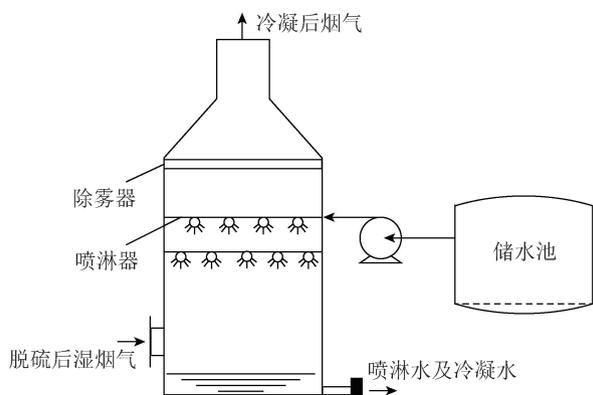


图4 直接接触换热器结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the direct contact heat exchanger

1) 间壁式冷却技术是烟气与换热介质不直接接触,水蒸汽在换热器表面凝结成液滴后,滴落至换热器底部的凝结水回收装置,该技术的传热阻力较大,换热效率较低,对换热器材质要求较高,但可保证冷却水侧水质稳定^[13]。为了提高冷却技术的换热效率与冷凝水捕集效率,雷承勇等^[14]将光管型间壁式水冷换热器布设于烟道中进行冷凝换热,研究了水蒸汽体积分数、流速、冷却水流量等对湿烟气冷

凝水捕集效率的影响,结果表明,烟气冷凝水捕集效率随着水蒸汽体积分数增大或冷却水流量增大而增大,且流速提高后冷凝水捕集效率降低,烟气中冷凝水的最大回收效率可达52%。Edward Levy等^[15]采用冷凝换热器进行中试试验,结果表明,其收水效率主要取决于烟气含湿量、冷却水进水温度、换热器设计和烟气与冷却水流量。熊英莹等^[16]将某600 MW机组湿法脱硫后烟气通过间壁式冷却换热器进行烟气冷凝回收水试验,经中试试验发现,烟气流速5.07 m/s、冷却水流速0.38 m/s时,烟气温度下降9~10 °C,换算到600 MW机组的实际烟气量情况下可实现回收凝结水90 t/h,若将凝结水合理利用,可降低电厂水耗。

同时,燃煤烟气中的颗粒物较多,在冷凝换热过程中会造成换热器表面积灰、结垢及磨损等问题,从而影响换热器的传热效率,最终影响设备运行的稳定性和安全性^[17]。王飞龙等^[18]采用数值模拟探究了2种典型H型翅片烟气换热器的气侧结垢特性,分析了烟气进入换热器的速度和烟气中颗粒粒径对结垢特性的影响,研究结果显示,随积灰的累积和脱离,最终灰尘的净沉积量达到一个稳定值,此时对应的污垢热阻为渐进污垢热阻,其随着烟气入口速度和烟气中颗粒粒径的增大而减小。

2) 直接接触式冷却技术主要以喷淋塔作为换热设备,冷却介质(一般是水)与烟气直接接触^[19]。该技术虽换热效率较高,传热阻力小,但会导致冷介质受灰尘、酸性气体等物质的污染^[20]。刘华等^[21]建立了直接接触式烟气余热回收试验系统,采用喷淋换热方式,探究了各因素对换热器换热效率的影响,结果表明,烟气量与喷淋水量比值、喷淋高度与喷淋水雾化液滴粒径是影响换热效率的主要因素。直接接触式冷却技术要求有足量的冷却介质,更适用沿海地区,采用海水作为冷源的电厂。同时,烟气中残存的SO₂、NO_x等酸性气体进入烟气冷凝水中会造成设备腐蚀^[22]。

此外,某些电厂采用浆液冷却技术,该技术是在脱硫塔喷淋层最顶层浆液入口增设冷却换热器,浆液经过换热器冷却喷入脱硫塔后与烟气接触反应,烟气温度可降低2~8 °C,对消除白色烟羽有显著效果,但用于冷却浆液的换热器存在易堵塞问题。烟气冷却技术可回收大量凝结水,且由于烟气中的颗粒物为水蒸汽的凝结提供了质核,更有利于水蒸汽的凝结,凝结后的液滴对烟气中的颗粒物也具有捕集、聚并等作用^[23-24]。因此该技术在回收烟气中水分的同时还具有协同降低或去除烟气中细颗粒物的

作用。但由于冷源消耗、积灰腐蚀、换热器材质要求较高使投资成本较高,单独使用烟气冷却技术的工程应用较少。

2.2 烟气加热消白技术

烟气加热消白技术是通过加热烟气使湿烟气处于不饱和状态,避免其在离开烟囱时形成白色烟羽,主要分为:① 烟气间接加热技术,该技术特点是烟气温度升高而烟气中总含湿量不变(图2中路径A—B—C),主要包括回转式换热技术(RGGH)、管式热媒循环烟气再热技术(MGGH)^[25]和热管再热技术(热管式GGH)^[26];② 烟气直接加热技术,其特点是烟气温度升高的同时烟气含湿量与烟气组分均发生改变(图2中路径A—G—C),如热二次风混合加热技术。

早期国内燃煤电厂大多采用从国外引进的回转式换热(RGGH)技术,工作原理是换热器两端具有蓄热和放热功能的转子在冷热两端循环转动,换热转子从高温原烟气侧吸收并储蓄热量,随后转到低温净烟气侧再放出热量使净烟气温度升高。回转式换热器具有易腐蚀、易堵塞等缺陷,且易泄漏^[27],即换热转子交替在原烟气和净烟气转动时,会将原烟气带入净烟气中;原烟气侧压力大于净烟气侧压力时,原烟气从密封间隙进入净烟气侧。

管式热媒循环烟气再热技术(MGGH)一般是在空气预热器与电除尘器之间设置烟气冷却换热器,在湿法脱硫塔后设置烟气加热换热器,热媒水在冷热2个换热器之间循环流动,原烟气经过烟气冷却换热器时将热量传递给换热器中的热媒水,之后其再将热量传递给脱硫后的净烟气,从而使烟气温度升高,湿度从近饱和或饱和变为未饱和状态;该技术可将即将进入电除尘装置的烟气温度降低到合适范围内,减小粉尘比电阻,提高电除尘的除尘效率,还可合理利用烟气的余热提高湿烟气温度,提高烟气的扩散能力,达到减轻或消除白色烟羽现象的目的,图5为MGGH的工作原理示意。

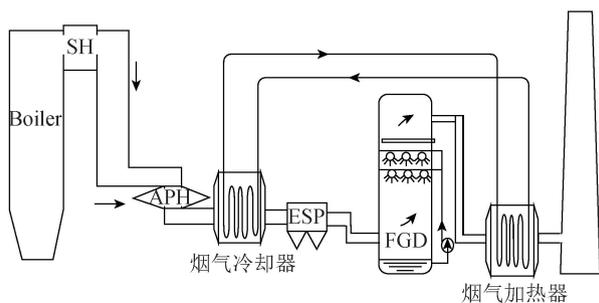


图5 MGGH工作原理

Fig.5 MGGH working principle diagram

热管再热技术(热管式GGH)通常将装有热介质的热管垂直穿过换热器壳体,净烟气与高温原烟气分别在壳体的上、下部流动且方向相逆。高温原烟气将热量通过管壁传给热管内的换热介质,介质吸热后汽化变为气体;气体在压力差作用下上升至净烟气侧,将汽化潜热传给管外净烟气后冷凝,在重力作用下回到高温原烟气侧,该技术通过换热介质的相变实现将高温原烟气的热量传递到净烟气侧^[28]。热管再热技术传热效率较高,且可避免泄漏问题,另外由于热管元件相互独立,即使存在单根或数根热管损坏,也不会影响整体的换热效率^[29],图6为热管式GGH的工作原理示意。

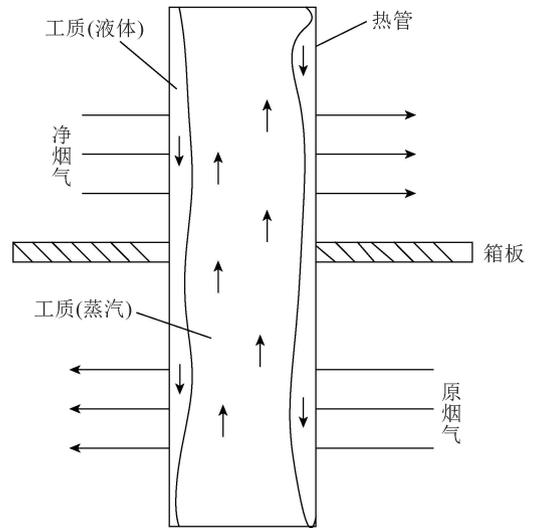


图6 热管GGH的工作原理

Fig.6 Heat pipe GGH working principle diagram

我国乌山电厂采用管式热媒循环烟气再热技术(MGGH)减少/消除湿烟羽现象。该电厂经湿法脱硫后烟气温度在50℃左右,经过MGGH换热器升温后,烟囱出口排烟温度可达80℃^[30],提高烟气抬升力和扩散能力的同时减轻了白色烟羽现象。

热二次风加热技术是将空预器一定量的热风直接引入净烟气中,混合后净烟气温度升高^[31]。国华台山发电厂燃煤机组锅炉烟气脱硫系统均采用湿法烟气脱硫工艺,为了避免湿烟气直接排放后形成白色烟羽以及酸性气体凝结对烟囱腐蚀等问题,采用热二次风加热净烟气方式提高烟囱排烟温度,其烟风混合段采用扩缩管烟道,保证烟-风迅速混合均匀的同时,对二次风起引流作用,混入热二次风后,减轻了烟气在离开烟囱后形成的白色烟羽现象^[32]。

烟气加热消白技术是较早用于消除燃煤电厂白色烟羽的技术。其技术相对成熟,且已在工程实例中应用。但难以避免腐蚀和堵塞问题,其中回转式换热器(RGGH)由于泄漏问题,目前大多数电厂已

将 RGGH 拆除^[33],而热管换热器(热管式 GGH)冷端的腐蚀和堵塞问题是影响其在工业应用的重要原因^[34],虽管式热媒循环烟气再热技术(MGGH)通过改进可避免泄漏问题,但 MGGH 换热设备占地面积大、投资费用大、运行成本高、能耗较大等问题突出。热二次风混合技术虽避免了堵塞、腐蚀等问题,却要求锅炉系统二次风有富余^[35]。烟气加热消白技术仅通过加热改变烟气在烟囱出口的状态点,达到视觉上的消白,并无法回收烟气中含有的大量水蒸汽及其夹带的颗粒污染物。

2.3 烟气冷凝复热消白技术

烟气冷凝复热消白技术是将冷却消白技术和加热消白技术相结合(图2中路径A—D—E—C)。该技术先通过冷却技术使烟气温度降低,烟气中的水蒸汽达到过饱和形成凝结水,将凝结水收集后,由烟气再热装置提高烟气温度。在冷凝过程中同时会脱除一部分污染物,随后烟气经再热可从视觉上消除白色烟羽。该技术的优点是烟气经过冷凝后,其含湿量大幅降低,使加热过程所需要升温的幅度减小,说明可采用品位更低的热源,但冷凝复热技术也存在冷却和加热技术的缺点。

舒喜等^[36]针对应用于300 WM 燃煤发电机组的烟气冷凝复热技术和 MGGH,进行了经济技术对比分析,结果表明,烟气冷凝复热消白技术与 MGGH 烟气加热消白技术基础投入费用大体相同,但前者可实现烟气中水分回收及颗粒物协同去除,回收的凝结水还可以补充脱硫系统的水耗,尤其适合于北方等缺水地区。

综上,3种消白技术均是通过换热方式实现减轻或消除白色烟羽,但均存在能耗过大、积灰腐蚀严重、换热设备材料要求较高、投资成本大等问题。

2.4 旋流除湿技术

由于 GGH 成本高、能耗大等问题难以彻底解决,国内燃煤电厂均取消 GGH,采用湿烟囱排放烟气,旋流除湿技术已被许多电厂用以减少湿烟气的含水量。旋流除湿技术是将旋流板安装在烟囱内,湿烟气通过烟囱内的旋流板时产生离心力,由于气液两相之间的密度差,烟气中的水雾或小液滴被甩向壁面,同时液滴之间发生聚并、碰撞等作用形成大液滴后下落^[37]。

除湿效率与压力损失是影响旋流除湿技术在实际工程中应用的重要因素。戴丽萍等^[38]通过数值模拟对某电厂烟囱安装旋流板前、后的流场特性进行了研究,且探究了旋流板的安装高度、安装仰角与安装级数对压力损失、除湿效率的影响,研究结果表

明,压力损失随旋流板的安装仰角减小而增加,随安装高度的增加而增加,增加旋流板级数并不会提高除湿效率。潘伶等^[39]采用 CFD 方法对装有旋流除湿装置的烟囱内部进行数值模拟研究,研究表明,旋流除湿技术可将烟气含水率降低近 50%,而压力损失从 195 Pa 增至 699 Pa,仍在可接受范围内,采用旋流除湿技术可捕捉湿烟气中的液滴,达到降低湿烟气含水率的效果。

旋流除湿技术依靠其自身的结构特性达到除湿效果,且不需消耗电能,具有负荷大、压降低和结构简单等优点。类似于旋流除湿技术的还有安装除雾器或湿式电除尘器,虽通过捕集湿烟气中部分液滴可起到一定的消白作用,但对于水蒸气无去除效果,并不能彻底消白。

2.5 溶液除湿技术

溶液除湿的本质是传热传质过程,其原理是水蒸汽在溶液与烟气之间的迁移,而迁移动力来源是两相之间的水蒸汽分压差,可同时完成蒸汽潜热的释放吸收和烟气中水分的回收。吸湿后的稀溶液经加热后,溶液表面的水蒸汽压力高于气相的水蒸汽压力,稀溶液中的水再次转移到气相中,这是除湿溶液的再生过程^[40],再生后的浓溶液可进行再次除湿吸水操作,形成溶液除湿和再生的循环过程。加热的热源可采用 60~80℃ 的太阳能或工业余热等低品位热源^[41-42],若能有效利用燃煤烟气余热,可进一步提高燃煤电厂能量利用效率。图7为溶液除湿的基本原理。

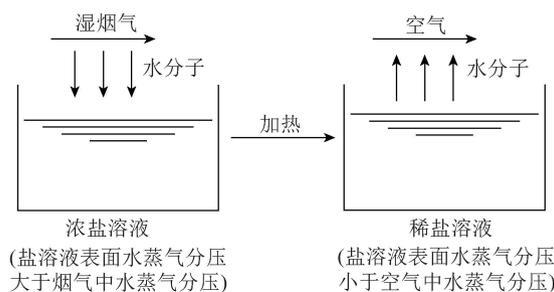


图7 溶液除湿基本原理

Fig.7 Basic principle of solution dehumidification

溶液除湿技术已广泛应用于空调暖通等行业,近年来该技术在燃煤电厂湿烟气水分回收领域引起了学者的关注。魏瑶等^[43]以喷淋吸收器为对象,以氯化钙溶液为除湿溶液,建模预测吸收过程的温度和浓度,试验研究了其与喷淋冷却除湿的区别,结果表明,喷淋冷却除湿的水耗量至少在溶液除湿的溶液耗量 5 倍以上才可达到相同的除湿效果。路源等^[44]以氯化钙溶液作为除湿吸收剂,以湿空气模拟烟气,研究了氯化钙与模拟烟气量比值、氯化钙溶液

浓度、冷却水水量等对除湿效率的影响,结果表明,提高氯化钙溶液浓度、氯化钙与模拟烟气量比值、冷却水量和吸收塔高度可增强吸收效果,但其数值需在合理范围内,否则会发生液泛、晶体析出、回收热量品位降低等问题。吕扬等^[45]以绝热型管式内降膜除湿试验台为基础,同样利用氯化钙溶液作为除湿溶液,研究了除湿溶液在吸收烟气中水分时的浓度、温度等因素对除湿效率的影响,试验结果表明,溶液除湿应用于回收湿烟气中的水分具有较大潜力,可实现近70%的收水率,此外还确定了溶液浓度、溶液温度等因素的最佳范围。Folkedahl等^[46]对燃煤电厂湿烟气中水分去除进行研究,采用溶液干燥剂除湿的方法去除烟气中的水分,且进行中试。但前人对除湿过程中的传质传热相关机理研究较少。

2.6 膜法除湿技术

近年来随着膜技术的发展,膜材料与膜技术逐渐进入各工业领域,膜法除湿技术是基于膜科技的发展而产生的技术,其基本原理是水蒸汽的浓度梯度与膜的高效选择透过性。

美国能源部和气体技术研究所^[47]于2000年开发了一种基于纳米多孔陶瓷分离膜的新技术,该技术可从烟气中提取部分水蒸汽和潜热,并将回收的水与热返回至蒸汽系统中,这是通过其传输膜冷凝器(TMC)实现的,如图8所示。水蒸汽通过分离膜,遇到低温水冷凝,同时水蒸汽中的潜热转化为显热,将低温水加热便于后续利用。

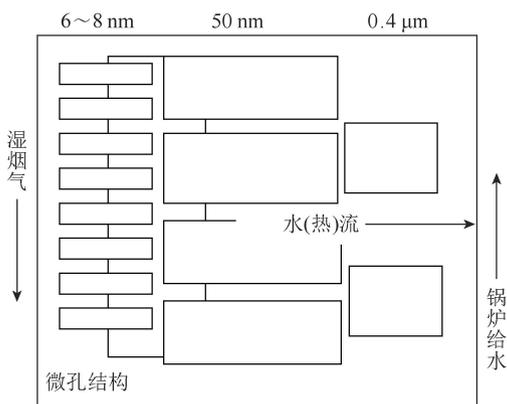


图8 TMC工作原理示意

Fig.8 Schematic diagram of TMC working principle

Hylke Sijbesma等^[48]以聚醚砜微滤中空纤维膜作为支撑材料,制备了具有SPEEK表层的复合中空纤维膜。通过测试发现,在人工模拟烟气和真实烟气中,该膜的水蒸汽渗透率、非水蒸汽的极低通透量等性能优异。在150 h的人工烟气试验中,该膜可实现 $0.6\sim 1.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 的水汽回收量,通透量与

选择性无明显变化;在3500 h真实烟气试验中,该膜实现了 $0.20\sim 0.46\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 的水汽回收量。我国对于膜法除湿的研究起步较晚,陈海平等^[49]通过自制中空纤维膜,选用湿氮气模拟真实湿烟气研究燃煤电厂湿烟气水分回收,研究了烟气温度、流速、水蒸汽活度等对收水效率的影响规律,并根据600 MW机组脱硫后湿烟气水分回收的计算结果表明,该方法可低成本、高效率回收烟气中的水蒸汽,且降低了烟气露点,具有节水减排、缓解烟道腐蚀的作用。

目前,虽然基于膜法去除或回收烟气中的水分相关研究较多,但大多均在实验室研究阶段,主要是由于膜法分离存在浓差极化现象,严重影响膜分离效率;且烟气中存在较多的颗粒物和酸性气体,对膜造成堵塞和腐蚀。

3 烟气加压凝结消白技术

收水及协同高效脱除湿法脱硫后的湿烟气中夹带的污染物是燃煤电厂消除白色烟羽的根本目的。因此,高效、低能耗地实现电厂可持续清洁生产是目前解决电厂白色烟羽的重要方向。上述消白技术均是通过常压条件下换热调温实现烟气消白,作者基于前期工作基础发现,若能够通过烟道流场设计、调控,使烟气瞬间加压^[50](图9),烟气压力为1.5或2倍大气压时,其温湿曲线出现“下移”,相同温度下含湿量大幅降低,此时饱和湿烟气中的水蒸汽会凝结成小液滴,再辅以高效分离装置,在烟气升压-凝结的同时将凝结水分离。当烟气压力恢复到常压状态时,其含湿量降低约 $22\text{ g}/\text{kg}$ (增压至1.5个大气压)。同时,蒸汽凝结会释放大量潜热,湿烟气状态点会移至点H,烟气被排入大气后点H-C的路线不会与温湿曲线相交,因此不会出现烟气凝结过程,消除了白色烟羽现象。

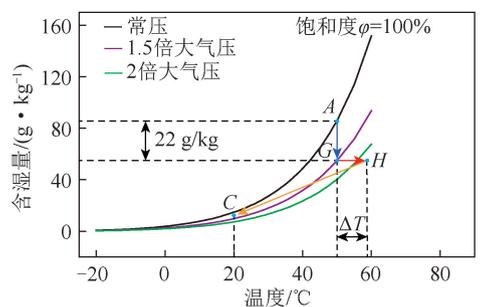


图9 加压凝结除湿技术路线示意

Fig.9 Schematic diagram of pressurized condensation dehumidification technology

烟气加压凝结消白技术不需要额外的换热设

备,不仅可有效回收湿烟气中水蒸汽,且可协同脱除夹带的细颗粒污染物,实现燃煤电厂多污染物协同脱除。同时,蒸汽凝结液化释放大量潜热,提高了烟气出口温度,烟气除湿与加热协同作用最终保障饱和湿烟气消白。

4 结语与展望

1) 烟气冷却消白技术需有冷源保障,适用于沿海城市以海水作为冷源的企业,内陆城市需配置机力通风塔辅助冷源降温。烟气加热技术是目前应用较广泛的技术,相比于回转式换热器、热管加热技术和热二次风烟气加热技术,MGGH 具有更好的应用前景。但烟气加热技术只能“视觉上”消白,无法回收烟气中的水分,且对于烟气夹带的细颗粒污染物无协同脱除作用。烟气冷凝复热技术,结合了烟气冷却和烟气加热的特点,仍需积累更多的工程应用经验。通过换热方式减轻或消除白色烟羽,均存在能耗过大、积灰腐蚀严重、换热设备材料要求较高、投资成本大等问题。

2) 旋流除湿技术结构简单、成本低、能耗低,但对于消除白色烟羽的作用有限。溶液除湿、膜法除湿技术国内外研究较多,目前大多停留在实验室阶段,距离实际工程应用尚早,且大多是针对回收烟气中的水分,对于消除湿烟羽贡献较小。

3) 烟气加压凝结除湿技术利用流场结构瞬间提高水蒸汽分压使其液化分离。同时,蒸汽凝结液化释放大量潜热,提高了烟气出口温度,烟气除湿与加热协同作用最终保障饱和湿烟气消白。该技术能耗较小,且在蒸汽凝结过程中饱和蒸汽内携带的细颗粒等污染物作为凝结核被凝结液滴协同脱除,是一种极具潜力的烟气消白技术。

4) 目前许多地区已出台治理白色烟羽政策,但仍缺少统一的规范与标准。应尽快制定符合环保、经济要求的政策,为各地区治理白色烟羽工作提供指导性意见。另外,不同地区对于消除白色烟羽应根据当地气候、环境、资源等条件进行合理的工艺设计和设备选型。

参考文献 (References):

[1] 河南省工业与信息化厅.工业和信息化部等部门联合实施《工业领域煤炭清洁高效利用行动计划》[EB/OL].[2015-03-27].<https://www.henan.gov.cn/2015/03-26/337618.html>.

[2] 环境保护部.火电厂大气污染物排放标准:GB 13223—2011[S].北京:中国环境科学出版社,2011.

Ministry of environmental protection.Emission standard of air pollutants in thermal power plants:GB 13223—2011[S].Beijing:China

Environmental Science Press,2011.

[3] 赵龙彬.燃煤烟气石灰石-石膏湿法脱硫影响因素研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2017,33(4):423-425.

ZHAO Longbin.Discussion on influencing factors of flue gas limestone gypsum wet desulfurization[J].Journal of Harbin University of Commerce(Natural Sciences Edition),2017,33(4):43-45.

[4] 贺鹏,张先明.中国燃煤发电厂烟气脱硫技术及应用[J].电力科技与环保,2014,30(1):8-11.

HE Peng,ZHANG Xianming.Flue gas desulphurization technology and its application in coal-fired power generation of China[J].Electric Power Environmental Protection,2014,30(1):8-11.

[5] 吴春华,颜俭,柏源,等.无GGH湿法烟气脱硫系统烟囱石膏雨的影响因素及策略研究[J].电力科技与环保,2013,29(3):15-17.

WU Chunhua,YAN Jian,BO Yuan,et al.Innuence factors and strategy research on gypsum rain of wet FGD system without GGH[J].Electric Power Environmental Protection,2013,29(3):15-17.

[6] 欧阳丽华,庄焯,刘科伟,等.燃煤电厂湿烟囱降雨成因分析[J].环境科学,2015,36(6):1975-1982.

OUYANG Lihua,ZHUANG Ye,LIU Kewei,et al.Analysis on mechanism of rainout carried by wet stack of thermal power plant[J].Environmental Science,2015,36(6):1975-1982.

[7] 马修元,惠润堂,杨爱勇,等.湿烟羽形成机理与消散技术数值分析[J].科学技术与工程,2017,17(22):220-224.

MA Xiuyuan,HUI Runtang,YANG Aiyong,et al.Numerical analysis of wet plume formation mechanism and dissipation technique[J].Science Technology and Engineering,2017,17(22):220-224.

[8] 李军状,朱法华,李小龙,等.燃煤电厂烟气中可凝结颗粒物测试研究进展与方法构建[J].电力科技与环保,2018,34(1):37-44.

LI Junzhuang,ZHU Fahua,LI Xiaolong,et al.Progress and method construction of condensable particles in flue gas of coal-fired power plants[J].Electric Power Environmental Protection,2018,34(1):37-44.

[9] 胡月琪,马召辉,冯亚君,等.北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征[J].环境科学,2015,36(6):1966-1974.

HU Yueqi,MA Zhaohui,FENG Yajun,et al.Emission characteristics of water-soluble ions in fumes of coal fired boilers in Beijing[J].Environmental Science,2015,36(6):1966-1974.

[10] ENGLAND G C,ZIELINSKA B,LOOS K,et al.Characterizing PM_{2.5} emission profiles for stationary sources:Comparison of traditional and dilution sampling techniques[J].Fuel Processing Technology,2000,65/66:177-188.

[11] 陈莲芳,徐夕仁,马春元,等.湿式烟气脱硫过程中白烟的产生及防治[J].发电设备,2005,19(5):326-328.

CHEN Lianfang,XU Xiren,MA Chunyuan,et al.Formation of white smoke in wet flue gas desulfurization processes and ways of prevention[J].Power Equipment,2005,19(5):326-328.

[12] 李文艳,王冀星,车建炜.湿法脱硫烟气湿排问题分析[J].中国电机工程学报,2007,27(14):36-40.

LI Wenyan,WANG Jixing,CHE Jianwei.Analysis

- oncorresponding problems of WFGD flue gas wet emission [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(14): 36-40.
- [13] 张亮,原亚东,孙志强,等.波纹管对管壳式换热器内流体传热及流动特性的影响[J].热能动力工程,2019,34(4):73-78.
ZHANG Liang, YUAN Yadong, SUN Zhiqiang, et al. Effects of corrugated tube on heat transfer and flow characteristics of fluid in shell heat exchanger [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(4): 73-78.
- [14] 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 Enlu, 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.
- [15] LEVY E, BILIRGEN H, JEONG K, et al. Recovery of water from boiler flue gas [OB/OL]. [2008-09-30]. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc925920/>.
- [16] 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.
- [17] 陈自勇,程旻,廖强,等.燃煤锅炉烟气侧换热表面的积灰机制及影响因素[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1349-1366.
CHEN Ziyong, CHENG Min, LIAO Qiang, et al. A review on ash deposition on heat exchanger surface in coal-fired boilers: Mechanisms and influence factors [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1349-1366.
- [18] 王飞龙,何雅玲,汤松臻,等.典型烟气余热换热器气侧积灰特性[J].科学通报,2017,62(12):100-109.
WANG Feilong, HE Yaling, TANG Songzhen, et al. Numerical study of fouling characteristics on two kinds of typical heat exchangers used in the waste heat recovery systems [J]. Chin. Sci. Bull., 2017, 62(12): 100-109.
- [19] 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.
TIAN Lunin, HAN Zhenan, 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.
- [20] 叶毅科,惠润堂,杨爱勇,等.燃煤电厂湿烟羽治理技术研究[J].电力科技与环保,2017,33(4):32-35.
YE Yike, HUI Runtang, YANG Aiyong, et al. Technical research of wet plume control in coal-fired power plant [J]. Electric Power Environmental Protection, 2017, 33(4): 32-35.
- [21] 刘华,周贤,付林.烟气与水冷凝换热影响因素实验研究[J].暖通空调,2015,45(7):90-95.
LIU Hua, ZHOU Xian, FU Lin. Experimental research on influence factors of direct-contact flue-gas-water condensation heat exchange [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(7): 90-95.
- [22] 裴勇,何雅玲.H型翅片管换热器烟气低温腐蚀影响因素实验研究[J].西安交通大学学报,2017,51(3):54-61.
PEI Yong, HE Yaling. Experimental study on Influence Factors of flue gas low temperature corrosion in H-type finned tube heat exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(3): 54-61.
- [23] 徐俊超,于燕,张军,等.液滴在燃煤细颗粒表面凝结的长大动力学特性[J].东南大学学报(自然科学版),2017,33(3):506-512.
XU Junchao, YU Yan, ZHANG Jun, et al. Kinetics study of droplet growth on surface of coal-fired fine particles [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 33(3): 506-512.
- [24] 刘晓燕.湿式除尘中液滴对气溶胶粒子捕集效率的影响[D].上海:东华大学,2013.
LIU Xiaoyan. Effect of droplets on aerosol particle collection efficiency in wet dust removal processes [D]. Shanghai: Donghua University, 2013.
- [25] 陈文理.MGGH技术在1000MW机组中应用的技术、经济性分析[J].电力建设,2014,35(5):103-107.
CHEN Wenli. Technical and economic analysis of MGGH technology application in 1000 MW unit [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(5): 103-107.
- [26] 张杰,梁慧敏,任艳.热管换热器与回转式换热器在湿法脱硫系统中的应用比较[J].能源与环境,2010(2):68-69,71.
ZHANG Jie, LIANG Huimin, REN Yan. Application comparison of heat pipe heat exchanger and rotary heat exchanger in wet desulfurization system [J]. China Energy and Environmental Protection, 2010(2): 68-69, 71.
- [27] 翟尚鹏,黄丽娜,曾艳.湿法脱硫净烟气再热技术的应用[J].环境工程,2015,33(8):52-55.
ZHAI Shangpeng, HUANG Lina, ZENG Yan. Application of clean flue gas reheat technology in the wet desulfurization [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(8): 52-55.
- [28] 张杰,任艳,张康,等.热管式GGH取代回转式GGH的可行性分析[J].建筑热能通风空调,2010,29(5):66-68.
ZHANG Jie, REN Yan, ZHANG Kang, et al. Feasibility analysis of replacement of heat-pipe GGH to regenerative GGH [J]. Building Energy & Environment, 2010, 29(5): 66-68.
- [29] 张海松,战洪仁,李晓堂,等.新型偏心径向热管式烟气余热回收系统设计与应用[J].过程工程学报,2017,17(1):156-161.
ZHANG Haisong, ZHAN Hong-ren, LI Xiaotang, et al. Design and application of the recovery system of waste heat from flue gas by new radial eccentric heat pipe [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(1): 156-161.
- [30] 李再亮,邢岩岩,马成龙.管式热媒水烟气换热器(MGGH)技术在发电厂除尘提效和消除烟羽的研究与应用[J].黑龙江科技信息,2017(4):119.
LI Zailiang, XING Yanyan, MA Chenglong. Research and application of tubular heat medium water flue gas heat exchanger (mggh) technology in dust removal and efficiency improvement and smoke plume elimination in power plants [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2017(4): 119.

- [31] 王春昌. 掺二次热风加热脱硫出口净烟气技术的经济性[J]. 中国电力, 2012, 45(1): 37-40.
WANG Chunchang. Economical efficiency of the technology using secondary hot air for heating cleaned outlet net gas of tile FGD [J]. Electric Power, 2012, 45(1): 37-40.
- [32] 李占元, 孙月, 杨建兴. 国华台山电厂 600 MW 机组加热脱硫后净烟气技术研究[J]. 热力发电, 2008, 37(9): 51-52.
LI Zhanyuan, SUN Yue, YANG Jianxing. Study on using hot air for heating cleaned flue gas in guohua taishan power plant [J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(9): 51-52.
- [33] 李晓金, 甄志. 取消 GGH 后湿法烟气脱硫系统设计方案[J]. 中国电力, 2010, 43(11): 56-59.
LI Xiaojin, ZHEN Zhi. Discussion on wet flue gas desulfurization system scheme for uninstalling GGH [J]. Electric Power, 2010, 43(11): 56-59.
- [34] 卢作基, 孙克勤. 热管式 GGH 在湿法烟气脱硫中的应用[J]. 电力环境保护, 2005, 21(4): 22-23.
LU Zuojie, SUN Keqin. Application of heat-pipe GGH in WFGD system [J]. Electric Power Environmental Protection, 2005, 21(4): 22-23.
- [35] 吴炬, 邹天舒, 冷杰, 等. 采用混合式烟气再热技术治理火电厂“石膏雨”[J]. 中国电力, 2012, 45(12): 28-30.
WU Ju, ZOU Tianshu, LENG Jie, et al. Elimination of gypsum rain with admixing and heating cleaned flue gas [J]. Electric Power, 2012, 45(12): 28-30.
- [36] 舒喜, 杨爱勇, 叶毅科, 等. 冷凝再热复合技术应用于燃煤电厂湿烟羽治理的可行性分析[J]. 环境工程, 2017(12): 82-85.
SHU Xi, YANG Aiyong, YE Yike, et al. Feasibility analysis of the condensation and reheating composite technology applied to the wet plume control in coal fired power plant [J]. Environmental Engineering, 2017(12): 82-85.
- [37] 吕刚, 向轶, 吕文豪, 等. 燃煤锅炉烟气消白技术的应用现状及研究进展[J]. 煤化工, 2019, 47(1): 4-8.
LYU Gang, XIANG Yi, LYU Wenhao, et al. Application status and research progress of coal fired boiler flue gas whitening technology [J]. Coal Chemical Industry, 2019, 47(1): 4-8.
- [38] 戴丽萍, 周强, 姚世刚, 等. 旋流板对烟气流场及除湿特性影响的数值研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(10): 842-848.
DAI Liping, ZHOU Qiang, YAO Shigang, et al. Effects of swirl vane on flow field and dehumidification characteristics of a chimney [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 842-848.
- [39] 潘伶, 杨沛山, 曹友洪. 燃煤电站直排烟囱二次脱水流场模拟与优化[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1248-1253.
PAN Ling, YANG Peishan, CAO Youhong. Numerical simulation and optimization of secondary dehydration flow field in direct-discharged chimney of coal fired power station [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1248-1253.
- [40] 殷勇高, 张小松, 权硕, 等. 溶液除湿冷却系统的再生性能实验研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 26(6): 915-917.
YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong, QUAN Shuo, et al. Experimental study on regeneration performance of liquid desiccant cooling system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 26(6): 915-917.
- [41] 殷勇高. 溶液除湿系统除湿/再生过程及其热质耦合机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
YIN Yonggao. Study on the coupled characteristic of heat and mass transfer between air and desiccant in liquid desiccant dehumidification and regeneration [J]. Nanjing: Southeast University, 2009.
- [42] AUDAH N, GHADDAR N, GHALI K. Optimized solar-powered liquid desiccant system to supply building fresh water and cooling needs [J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 3726-3736.
- [43] 魏瑶, 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.
- [44] 路源, 徐震, 肖云汉. 开式吸收式热泵降膜吸收器实验研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(8): 1158-1162.
LU Yuan, XU Zhen, XIAO Yunhan. Experimental study of the falling film absorber in the open cycle absorption heat pump [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(8): 1158-1162.
- [45] 吕杨, 董勇, 田路泞, 等. 燃煤电厂湿烟气的除湿特性[J]. 化工学报, 2017, 68(9): 3558-3564.
LYU Yang, DONG Yong, TIAN Luning, et al. Dehumidification performance of wet flue gas in coal-fired power plant [J]. CIESC Journal, 2017, 68(9): 3558-3564.
- [46] FOLKEDAHL BC, WEBER GF, COLLINGS ME. Water extraction from coal-fired power plant flue gas [R]. Grand Forks: University of North Dakota, 2006.
- [47] WANG D, BAO A, KUNC W, et al. Coal power plant flue gas waste heat and water recovery [J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 341-348.
- [48] SIJBESMA H, NYMEIJER K, MARWIJK R V, et al. Flue gas dehydration using polymer membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 313(1): 263-276.
- [49] 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汽[J]. 热力发电, 2017, 46(1): 100-105, 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): 100-105, 111.
- [50] 王飞, 杨晓阳, 杨凤玲, 等. 一种基于变压凝结的水蒸汽及细颗粒污染物协同脱除装置: 110237633A. [P]. 2019-09-17.
WANG Fei, YANG Xiaoyang, YANG Fengling, et al. A collaborative removal device of water vapor and fine particle pollutants based on pressure swing condensation: 110237633A. [P]. 2019-09-17.