

# 燃煤电厂湿烟气余热及水分回收技术研究

田路泞<sup>1</sup>, 韩哲楠<sup>1</sup>, 董勇<sup>2</sup>, 吕扬<sup>2</sup>, 李玉忠<sup>2</sup>, 陈玺<sup>1</sup>, 刘威<sup>1</sup>

(1. 武汉光谷环保科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 燃煤污染物国家工程实验室(山东大学), 山东 济南 250061)

**摘要:**为了降低燃煤电厂脱硫后烟气中的含湿量,有效回收烟气中的水分及余热,同时解决因饱和湿烟气中水蒸气凝结引起的烟囱腐蚀、“烟囱雨”及“白烟”等问题,分析了湿烟气的热力特点及能量分布的形式,介绍并对比了冷凝法、溶液吸收法及膜法3种较为可行的湿烟气除湿工艺,论述了其技术特点、研究现状、不足及研究方向。研究表明,脱硫后湿烟气中每千克干烟气含湿量约80 g,70%余热以水蒸气潜热的形式存在,冷凝法现阶段相对较为成熟,但吸收法除湿潜力更高、膜法系统简单稳定可靠,具有非常好的应用前景,是烟气除湿工艺研究的趋势;低品位余热的经济利用途径将是燃煤电厂烟气除湿技术的一个重要研究方向。

**关键词:**燃煤电厂;湿烟气;除湿;冷凝法;溶液除湿;膜法

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)05-0105-06

## Review of water recovering technologies from flue gas in coal fired power plant

TIAN Luning<sup>1</sup>, HAN Zhe'nan<sup>1</sup>, DONG Yong<sup>2</sup>, LYU YANG<sup>2</sup>, LI Yuzhong<sup>2</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>

(1. Wuhan Optics Valley Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 2. National Engineering Laboratory for Coal-fired Pollutants Emission Reduction (Shandong University), Jinan 250061, China)

**Abstract:** In order to reduce the water content in scrubbed gas after FGD discharged from coal-fired power plant, to recover water and waste heat from saturated flue gas, as well as to eliminate the problems of corrosion, stack liquid discharge and plume downwash caused by vapor condensation, this paper analyzed the thermal characteristic and energy distribution in wet flue gas, and made a brief introduction and comparison of three approaches on water recovering from wet flue gas. Such methods, including condensation, liquid desiccant-based dehumidification (LDD) and membrane were feasible for the wet flue gas dehumidification, and their technical features, research status, shortcomings and research progress were reviewed. It is found that the vapor concentration in wet flue is about 80 g, more than 70% of waste heat is in the form of latent heat. Condensation method is a relatively matured technology at the present stage, while LDD method has a higher water recovery capacity and the process of membrane method is relatively simple. These technologies have a promising application prospect and represent the research trend of flue gas dehumidification. The economic way of low grade heat utilization will be one of the important research directions of flue gas dehumidification.

**Key words:** coal fired power plant; flue gas; dehumidification; condensation; liquid desiccant dehumidification; membrane

## 0 引 言

燃煤发电是我国主要发电形式,截至2015年,燃煤发电装机容量占我国发电装机总容量的59%<sup>[1]</sup>,燃煤电厂发电量占全国总发电量的

67.9%,燃煤发电消耗标准煤11.5亿t,约占全国煤炭消费总量42%。作为耗水耗能大户,巨大的水资源、能源消耗使得燃煤电站成为节能减排的重点。我国2005—2020年电力发展规划中明确提出了发电节水的问题,必须着力发展适用于水资源短缺地

收稿日期:2017-04-06;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.05.020

基金项目:山东省重点研发计划资助项目(2016GGX104009)

作者简介:田路泞(1983—),男,山东德州人,工程师,博士,研究方向为节能环保。E-mail: tianluning@126.com。通讯作者:董勇,教授,博士,研究方向为燃煤污染物综合控制技术。E-mail: dongy@sdu.edu.cn

引用格式: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 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.

区的节水型烟气污染控制技术;此外,工业用水成本逐步升高,2012年,国家修订了取水定额标准,将火力发电取水定额在2002年的基础上下调了30%以上<sup>[2]</sup>;2015年4月,我国出台了《水污染防治行动计划》(简称“水十条”),提出了严格的水污染防治目标,燃煤电厂面临着巨大的节水减排压力,而我国大部分新建燃煤机组选址在西部产煤缺水地区,节水降耗需求迫切,经济有效的节水降耗措施将对我国建设环境友好型、资源节约型社会意义重大。如何减少脱硫后水蒸汽及余热的排放,是燃煤电厂节水降耗的重点方向之一。由于烟气中水分及潜热的耦合效应,有效的烟气除湿技术可同时回收水分及潜热,降低电厂水耗及排烟损失,并从根本上解决烟囱腐蚀及“白烟”现象。本文分析了脱硫后湿烟气的热力状态特点,介绍了冷凝法、吸收法及膜法3种湿烟气除湿工艺的技术特点及其研究现状,指出了存在的问题及研究方向,为高效烟气除湿技术的研发提供参考。

## 1 脱硫后湿烟气热力状态分析

绝大多数燃煤电厂采用湿法脱硫工艺,脱硫过程中大量水分蒸发,烟气中水蒸气体积分数由6%升至约11%,出口烟气中每千克干烟气含湿量80~100 g。锅炉系统尾部排放的水蒸汽及低温余热是燃煤电厂水资源和能量消耗的重要组成部分。以300 MW机组为例,脱硫后烟气携带水分超过100 t/h。锅炉系统的各项热损失中,排烟损失占总损失的50%以上,约占燃煤低位发热量的6%。脱硫后烟气显热的比例由63%降至25%,而水蒸气潜热由37%升高至75%,如图1所示。大部分烟气显热转换为水蒸气潜热,即脱硫后烟气热量主要以水蒸气潜热的形式存在。

## 2 湿烟气除湿技术的发展

常用的空气湿度调节方法包括冷凝除湿、液体吸收剂吸收除湿、固体吸收剂吸附除湿、膜法除湿等。随着技术的发展,出现了一系列新型除湿技术,包括热电冷凝除湿、电化学除湿等<sup>[3]</sup>,但距离应用尚远。冷凝法是空调领域广泛采用的湿度调节方式,采用7℃冷冻水将空气温度降至露点温度以下使水蒸气凝结析出。由于冷凝后需再热、盘管表面滋生霉菌使空气品质恶化等缺点,基于溶液除湿(吸收法)的空气除湿工艺得到越来越多的应用。

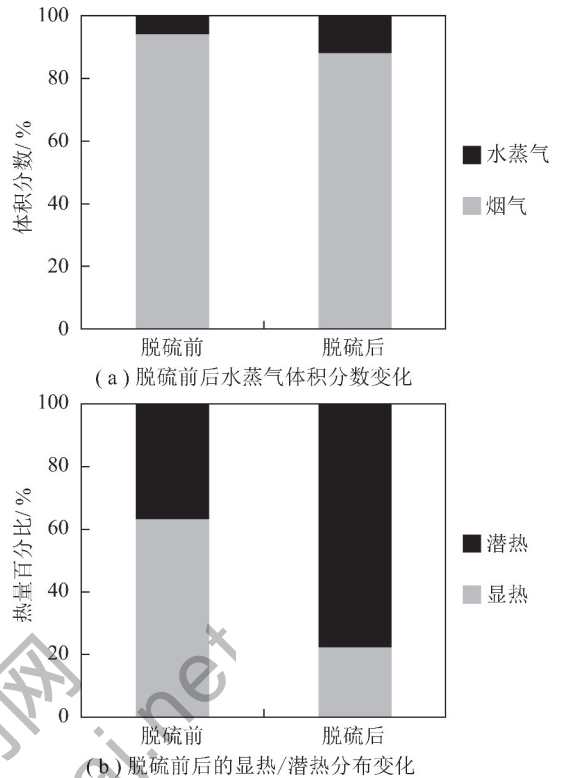


图1 脱硫前后烟气参数的变化

Fig. 1 Variation of flue gas thermal parameters before/after FGD

烟气除湿方向的研究相对较少,尚处于起步阶段,目前研究多采用冷凝法、吸收法及膜法。

### 2.1 冷凝法

湿烟气冷凝除湿工艺可分为两类:第1类采用间壁式换热器<sup>[4]</sup>,烟气与冷却水通过换热器相互隔离,水蒸气在换热器表面凝结并将热量传递给冷却水,换热器底部设有回收装置收集凝结水,如图2(a)所示,换热器可采用单级或多级;第2类采用直接接触式<sup>[5]</sup>,如图2(b)所示,通过喷淋塔或填料塔等方式对烟气降温,水蒸气凝结并混入冷却水,烟气显热及水蒸气的潜热均进入冷却水。间壁式换热器热阻较大,但冷却水侧水质稳定,同时分离出冷凝水便于处理。直接喷淋式效果较好,但烟气中粉尘、酸、盐等成分的富集,使系统出水需进行处理以达到回用要求。

上述两类冷凝方式的热力过程相同,如图3所示(图中含湿量以每kg干空气计),湿烟气由点1沿100%相对湿度线降至点2,温湿度同时降低。所回收的水量即点1与点2的含湿量差为 $d_1 - d_2$ ,所回收的热量即点1与点2的焓差 $h_1 - h_2$ ,烟气始终保持饱和状态。

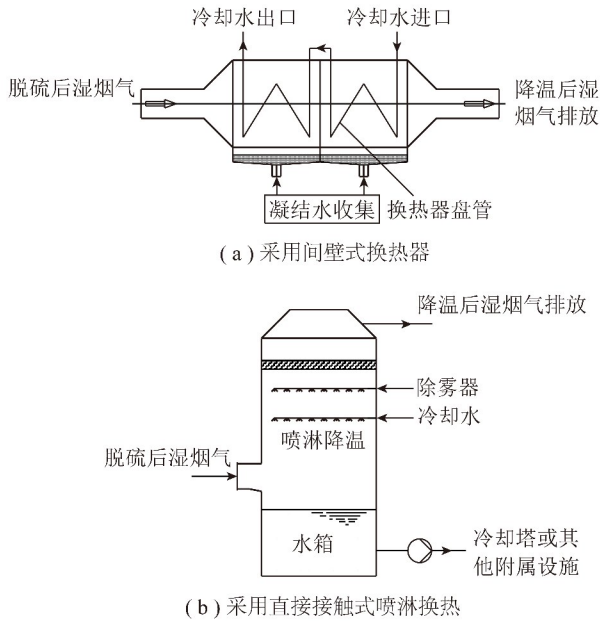


图2 湿烟气冷凝除湿工艺

Fig. 2 Condensation system of wet flue gas dehumidification

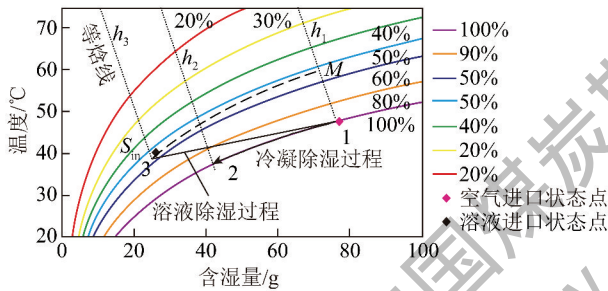


图3 焓湿图上冷凝法及吸收法的热力过程

Fig. 3 Thermodynamic process of condensation and liquid desiccant dehumidification in psychrometric chart

冷凝法于20世纪70年代在欧洲应用于冷凝式燃气锅炉以提升锅炉能效,后逐步推广至工业锅炉,国内应用尚较少<sup>[6]</sup>。近年来,利用冷凝法回收燃煤电厂烟气中水蒸气的研究逐步增加。Levy E等<sup>[7]</sup>进行了冷凝法回收烟气中水分的研究,采用多级换热装置冷却烟气回收冷凝水作为冷却塔补水。研究表明,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。CHEN Q等<sup>[8]</sup>进行了工业锅炉增设烟气冷凝器预热锅炉给水的研究,提出换热器热阻集中于壳侧,包括气相对流热阻、污垢热阻及水液膜热阻。雷呈勇等<sup>[9]</sup>模拟褐煤锅炉排烟,进行了烟气水分冷凝回收技术的实验室研究,在烟气温度50~60℃的条件下探索了烟气流速、水蒸气容积份额、冷却水流量及流动方式等因素对冷凝液捕集率的影响,研究表明,

冷凝水捕集率最大可达51.57%,但应考虑酸腐蚀及清除潮湿积灰的问题。熊英莹等<sup>[4]</sup>在某600 MW燃煤机组湿法脱硫后进行了中试试验,在湿烟气烟道中加装改性氟塑料换热器,采用冷凝法实现高水分烟气的深度凝结,回收水分和汽化潜热,结果表明,当烟气温度降低9~10℃时,所回收的水分作为脱硫系统补水可以实现脱硫系统零水耗。

低品位热能的利用是水分回收过程中需重点研究的问题之一,锅炉尾部烟气温度较低,出水水温难以继续提升,所吸收热量的利用一般采用2种方式:一种是在冷凝器出水侧加装热泵,将热量品位提高以达到供暖或其他利用要求,具有较好的前景;另一种是预热锅炉给水,但由于温度低,温差较小,传热系数低加热能力有限。将喷淋换热与热泵技术充分结合,回收烟气余热以供暖的应用研究较多:杜红波等<sup>[10]</sup>介绍了某小区14 MW燃气锅炉烟气余热回收改造工程,采用喷淋水对烟气喷淋降温回收余热并使部分水蒸气凝结,并采用吸收式热泵回收余热,满负荷运行状态下烟气进出口温度为110℃/35℃,热回收量1.8 MW,供热提高率12%;ZHAO等<sup>[11]</sup>将燃气锅炉烟气喷淋余热回收装置与分布式热泵供暖系统结合,通过分布式热泵的应用,降低一次网回水温度,提高喷淋余热回收装置的余热回收能力,采用两级喷淋式换热装置预热一次网回水,在第1级换热装置中,热网回水与喷淋循环水通过板式换热器换热;在第2级中,采用热泵系统进一步提取余热,从而更充分的回收烟气余热。此外,喷淋换热与热泵结合的余热回收技术进行了工业示范,在1台220 t循环流化床锅炉及3台130 t煤粉炉的脱硫系统下游汇合烟道上,安装了喷淋降温装置并配套溴化锂吸收式热泵。系统运行数据表明,烟气温度由48℃降至39℃,回收余热16.7 MW用于热电厂供热,同时,喷淋装置有益于烟气的深度净化。

此外,应用至非热电联产的燃煤电厂时,热利用的途径及工艺参数有待深入分析,且系统工艺系统较为复杂,应用至大机组成本较高,采用间壁式换热工艺时,抗腐蚀材料价格较高。

## 2.2 吸收法

溶液吸收法基于蒸汽压差驱动水蒸气在溶液与烟气之间的迁移,同时完成汽化潜热的释放和吸收,工艺包含除湿与再生两大环节。采用具有吸湿性能的溶液作为除湿剂,如溴化锂、氯化锂、氯化钙、三甘醇等物质的水溶液,与烟气直接接触实现水分的迁



移,当吸湿溶液的水蒸气分压力低于烟气的水蒸气分压力时,烟气中的水分向溶液迁移,即为除湿过程,反之则为溶液的再生过程。由于溶液蒸汽压远低于烟气中的水蒸气分压,与冷凝法相比,溶液吸收法能够回收更多的水蒸气,且出口烟气处于不饱和状态,其热力过程如图3中1~3所示,回收水量即点1与点3的含湿量差为 $d_1-d_3$ ,回收热量为点1与点2的焓差为 $h_1-h_3$ ,烟气相对湿度降至不饱和区。

在空调领域,溶液除湿工艺中涉及的溶液物性<sup>[12]</sup>及溶液的选择、热质交换规律、除湿装置结构及流型的选择等研究已较多,溶液除湿装置及设备也已实现产业化生产<sup>[13]</sup>,目前,部分学者逐步将该技术推广应用至烟气除湿的研究。

FOLKEDAHL等<sup>[14]</sup>进行了除湿溶液回收烟气中水分的研究,该项目对比评估了不同除湿剂的性能,并采用氯化钙溶液分别在燃烧天然气及长焰煤的锅炉烟气中进行了中试试验,探究了烟气中各种污染物对溶液除湿系统的影响,分析了回收水的水质,研究结果验证了工艺可行性,回收水分水质较好。

魏璠等<sup>[15]</sup>研究了开式循环吸收式热泵用于燃气轮机烟气中水回收的技术方案,采用氯化钙溶液喷淋吸收器,与冷却水喷淋减湿回收水效果进行对比,结果表明,达到相同的除湿量,冷凝法的冷却水流量是溶液流量的5倍以上。路源<sup>[16]</sup>研究了回收燃气烟气中水和潜热的单段开式吸收式热泵循环,研究表明,该工艺可以实现HAT循环水平衡,回收热量品位较高(50℃以上)。

LARS等<sup>[17]</sup>提出采用两级开式吸收式循环用于100 kW生物质锅炉烟气颗粒物脱除及余热回收,吸收器采用填料式,回收余热分三级预热供暖回水,引用部分锅炉热烟气用于溶液再生,工艺流程如图4所示。进口烟气温度150~180℃,出口烟气温度50~55℃,出口烟气相对湿度38%~45%,燃用高水分燃料时,机组供热能力提高近40%(不计电耗增加)。

LIU等<sup>[18]</sup>通过焓湿图研究了溶液与空气热质交换过程终状态的可及处理区域,为除湿过程状态点的预测提供了参考,研究提出:空气的出口状态点在由空气进口状态、溶液进口状态、进口溶液等相对湿度线与进口空气等焓线的交点构成的三角区域内(图3),当溶液流量相对于空气流量非常大(气液质量流量比很小)时,空气处理过程的终状态点位于

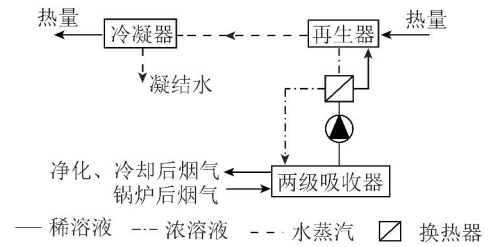


图4 开式吸收式循环用于余热回收工艺示意

Fig. 4 Schematic diagram of heat recovery with an open absorption system

两流体进口状态的连线上,随着溶液流量增大,空气终状态接近与溶液进口状态。

除湿溶液的选择是影响吸收法烟气除湿应用的关键因素之一,需综合考虑除湿(再生)性能、热湿传递性能、输配性能、溶液结晶性、成本、腐蚀性等因素,同时适应大烟气量下的应用需求。空调领域最早选用三甘醇、二甘醇溶液作为除湿剂,由于其挥发性而逐步弃用,后多选用溴化锂、氯化锂、氯化钙溶液。除湿剂价格是影响系统经济性的重要因素,以分析纯试剂价格为例,溴化锂260~450元/kg,无水氯化锂约240元/kg,无水氯化钙16元/kg,由于溴化锂、氯化锂价格较高,部分学者研究发现,采用2种或多种溶液的混合溶液<sup>[19-20]</sup>或在溶液中添加表面活性剂<sup>[21]</sup>,可以有效降低成本并保证除湿性能。STUDAK等<sup>[22]</sup>对LiBr、LiCl、CaCl<sub>2</sub>及TEG溶液进行了初步评价,提出采用权重因子与溶液特性综合评分法,结果表明,CaCl<sub>2</sub>溶液的得分最高,在价格方面优势明显。

相比于冷凝法,溶液除湿法回收水分及余热的潜力更大,湿烟气相对湿度可降至不饱和态,避免了湿烟气在烟囱内及烟囱出口结露,可避免烟囱腐蚀和“白烟”现象,降低烟囱防腐需求,因此吸收法具有一定优势,但高浓度的盐溶液对防腐材料的选择提出了更大的挑战,并可能出现盐溶液被烟气携带的现象,且需配套溶液再生及处置等系统。

### 2.3 膜法

膜科学技术已成功应用于分离、浓缩、提纯、净化等工业生产过程中,膜法除湿近年来也得到越来越多的研究,其机理是利用膜两端的浓度差及膜的选择透过性,实现水蒸气与氮气、氧气等不凝气体的分离,然后采用冷凝的方式使水蒸汽液化。常规膜法除湿原理如图5所示。目前各行业膜材料种类较多,膜组件形式多样,兼有较高的水蒸汽选择性和透过性,但适用于燃煤烟气除湿的膜材料仍匮乏。相

比于其他除湿方式,膜法具有很多突出的优点<sup>[23]</sup>:除湿过程连续进行、无腐蚀问题、无需阀门切换、无运动部件、系统可靠性高、能耗小等。

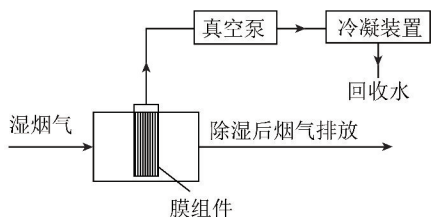


图5 膜法烟气除湿示意

Fig. 5 Schematic diagram of flue gas dehumidification with membrane technology

由于聚醚醚酮(PEEK)材料<sup>[24]</sup>具有较高的水蒸气穿透性及相对于氮气的选择透过性,可被用于烟气除湿研究的膜材料。SIJBESMA等<sup>[25]</sup>与Kema公司等单位合作,采用覆有SPEEK材料的复合中空纤维膜对燃煤电厂脱硫后湿烟气除湿以避免烟气结露,利用内部抽真空的方式形成水蒸气分压力差,推动水蒸气的迁移。通过实验室研究确认了SPEEK材料优良的水蒸气选择透过性,实际烟气 $5\,300\text{ m}^3/\text{h}$ 的中试试验验证了膜材料性能的稳定性,回收水水质较好,可作为软化水装置补水。

陈海平等<sup>[26]</sup>制备了涂覆有磺化聚醚醚酮(磺化度56%)的聚醚砜中空纤维膜(PES-SPEEK56),研究应用于火电厂排烟中水蒸气的回收利用,探索了不同烟气温度、烟气流速、水蒸气活度下的水分回收性能。试验结果计算表明,应用于600 MW机组脱硫后 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 湿烟气水分回收,布置200万根有效长度为500 mm的中空纤维膜,可回收水分37.9 t/h,水回收率28.3%,烟气露点温度降低 $6.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

近年来,采用新型材料或制备工艺的膜组件在陆续开发和试验中。WANG<sup>[27]</sup>开发了亲水性纳米陶瓷膜及两段式工业膜装置,材料性能较好,具有水蒸气高度选择透过性,可同时回收烟气中水及余热。试验表明,纳米陶瓷膜性能稳定,烟气露点温度由 $54\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $34\text{ }^\circ\text{C}$ ,装置前后水质分析及结垢测试表明,回收水质与装置入口水质未发现明显差异,未发现明显结垢问题,该技术可用于多种工业环境下水分的回收,性能优异,前景较好。此外,亲水性多孔高分子膜<sup>[28-29]</sup>、纳米多孔管式陶瓷膜<sup>[30]</sup>等膜组件也得到了试验的验证,具有较好的水回收应用潜力。

膜法除湿工艺能够有效避免其他工艺存在的腐蚀、结垢、运行费用高等问题,系统简单,可靠性高,

具有良好应用前景,但目前国内该技术在烟气复杂成分环境下的长时间除湿试验研究匮乏,全尺度应用的技术可靠成熟度有待评估,在除湿用膜材料的研发、膜组件装置的应用及优化、膜材料在烟气中的适应性等方面,有待深入研究。

### 3 结 论

1)燃煤电厂脱硫后湿烟气中含有大量水分,烟气中每千克干烟气含水量约80 g,且约70%的热能以水蒸气潜热形式排放,通过合理的除湿方式,可以回收大量水分及其汽化潜热,实现节水降耗,具有广阔的应用空间。国外已在此领域深入研究多年,国内研究仍有待进一步深入拓展。

2)目前可行的技术路线包括冷凝法、溶液吸收法及膜法。冷凝法系统相对简单,国内已开展较多的研究并进行了中试及工业示范,由于热量品位低,多辅以热泵技术提升品位后用于供暖,分析确定针对非热电联供机组的余热利用途径及参数是该技术推广的重要方向;溶液吸收法的除湿及热回收潜力最大,除湿效果优异,出口烟气相对湿度低,有望彻底解决烟卤腐蚀、“白烟”等问题,但需配备再生系统,并协调多个换热工序,工艺流程较为复杂,研究该工艺的最佳流程与工程参数,进行中试及工程示范,将是该技术的发展方向,此外,溶液的腐蚀问题也是该技术需克服的难点之一;膜法工艺简单,可靠性高,前景较好,目前水回收潜力相对较低,当前膜材料的选用、制备及可靠性仍有待研究,开发适用于复杂烟气成分条件下的膜材料仍是该工艺的重点。

3)高效经济的烟气除湿技术将有助于电厂降低水耗,充分利用余热资源,为缺水地区的电厂运行提供技术支撑。

### 参考文献(References):

- [1] 中电联规划与统计信息部. 2014年电力统计基本数据[EB/OL]. [2015-11-30]. <http://www.cec.org.cn/>.
- [2] 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.
- [3] 赵伟杰, 张立志, 裴丽霞. 新型除湿技术的研究进展[J]. 化工进展, 2008, 27(11): 1710-1718.  
ZHAO Weijie, ZHANG Lizhi, PEI Lixia. Progress on novel air dehumidification technologies[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(11): 1710-1718.

- [4] 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.
- [5] 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]. HV&AC, 2015, 45(7): 90-95.
- [6] 裴光泰. 冷凝锅炉技术分析[J]. 工业锅炉, 2009(2): 29-31.  
PEI Guangtai. Condenser Boiler Technology Analysis[J]. Industrial Boiler, 2009(2): 29-31.
- [7] LEVY E, BILIRGEN H, DUPOINT J. Recovery of water from boiler flue gas using condensing heat exchangers[R]. Bethlehem: Lehigh University, 2011.
- [8] CHEN Q, FINNEY K, LI H, et al. Condensing boiler applications in the process industry[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 30-36.
- [9] 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.
- [10] 杜红波,王庆丰,张广耀,等. 吸收式热泵在燃气锅炉烟气余热中的应用案例分析[J]. 区域供热, 2017(1): 7-15.
- [11] ZHAO X L, FU L, WANG X Y, et al. Flue gas recovery system for natural gas combined heat and power plant with distributed peak-shaving heat pumps[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 599-607.
- [12] CONDE M R. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides; formulations for use in air conditioning equipment design[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(4): 367-382.
- [13] 刘晓华,李震,张涛. 溶液除湿[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 路源. 高湿度烟气中水及潜热的开式吸收式热泵回收技术研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2010.
- [17] LARS W, ROGER H, JONATHAN F. Flue gas purification and heat recovery; A biomass fired boiler supplied with an open absorption system[J]. Applied Energy, 2012, 96(3): 444-450.
- [18] LIU X H, JIANG Y. Coupled heat and mass transfer characteristic in packed bed dehumidifier/regenerator using liquid desiccant[J]. Energy Conversion & Management, 2008, 49(6): 1357-1366.
- [19] ERTAS A, ANDERSON E E, KIRIS I. Properties of a new liquid desiccant solution-Lithium chloride and calcium chloride mixture[J]. Solar Energy, 1992, 49(3): 205-212.
- [20] LI X W, ZHANG X S, WANG G, et al. Research on ratio selection of a mixed liquid desiccant: Mixed LiCl-CaCl<sub>2</sub> solution[J]. Solar Energy, 2008, 82(12): 1161-1171.
- [21] FRANCÉS V M S, OJER J M P. Multi-factorial study of the absorption process of H<sub>2</sub>O(vap) by a LiBr(aq) in a horizontal tube bundle using 2-ethyl-1-hexanol as surfactant[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2004, 47(14): 3355-3373.
- [22] STUDAK J W, PETERSON J L. A preliminary evaluation of alternative liquid desiccants for a hybrid desiccant air conditioner[C]. Austin: Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, 1988: 155-159.
- [23] 董军涛,张立志. 膜法空调除湿的原理与研究进展[J]. 暖通空调, 2008, 38(5): 22-28.  
DONG Juntao, ZHANG Lizhi. Principle and research progress of membrane-based dehumidification for air conditioning[J]. HV&AC, 2008, 38(5): 22-28.
- [24] WANG F, CHEN T, XU J. Synthesis of poly(ether ether ketone) containing sodium sulfonate groups as gas dehumidification membrane material[J]. Macromolecular Rapid Communications, 1998, 19(2): 135-137.
- [25] SIJBESMA H, NYMEIJER K, MARWIJK R V, et al. Flue gas dehydration using polymer membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2008, 313: 263-276.
- [26] 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): 100-105.  
CHEN Haiping, LIU Yanda, ZHOU Ya'nan. 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.
- [27] WANG D X. Transport membrane condenser for water and energy recovery from power plant flue gas[R]. Des Plaines: Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2012.
- [28] BRUNETTI A, SANTORO S, MACEDONIO F, et al. Waste gaseous streams: from environmental issue to source of water by using membrane condensers[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2014, 42(8): 1145-1153.
- [29] MACEDONIO F, BRUNETTI A, BARBIERI G, et al. Membrane condenser as a new technology for water recovery from humidified "Waste" gaseous streams[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(3): 1160-1167.
- [30] ZHAO S, YAN S, WANG D K, et al. Simultaneous heat and water recovery from flue gas by membrane condensation; Experimental investigation[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 113: 843-850.