

燃煤电厂烟气水分膜法回收技术的研究进展

负延滨^{1,2} 邢 絮¹ 庄国强² 李 萌² 张言格¹ 杨文娟² 代雅男² 张天娇² 刘锋瑞²

1.北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083

2.滨州铝产业先进制造山东省实验室, 滨州魏桥国科高等技术研究院, 山东 滨州 256606

[摘要]针对燃煤电厂锅炉排放烟气高湿度组分处理难题,如脱硫后烟气含湿量过高引发的烟气余热散失、烟囱腐蚀及“烟囱雨”现象,文章梳理了膜分离技术及其在烟气水分回收中的应用,探讨了膜法烟气脱水技术的进展,揭示了核心问题的解决策略。为有效推动火电行业节能减排目标,构建绿色低碳的能源体系提供技术支撑。

[关键词]燃煤烟气; 膜分离; 水蒸气捕集; 复合膜

DOI: 10.33142/nsr.v3i2.20002

中图分类号: TQ028.8

文献标识码: A

Research Progress on Membrane Method for Recovering Moisture from Flue Gas of Coal-fired Power Plants

YUN Yanbin¹, XING Xu¹, ZHUANG Guoqiang², LI Meng², ZHANG Yange¹, YANG Wenjuan², DAI Yanan², ZHANG Tianjiao²,
LIU Fengrui²

1. College of Environmental Science & Engineering, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China

2. Binzhou Aluminum Industry Advanced Manufacturing Shandong Provincial Laboratory, Binzhou Weiqiao Guoke Advanced
Technology Research Institute, Binzhou, Shandong, 256606, China

Abstract: In response to the challenges of treating high humidity components in flue gas emissions from coal-fired power plant boilers, such as waste heat loss caused by high humidity in flue gas after desulfurization, chimney corrosion, and the phenomenon of "chimney rain", this article summarizes membrane separation technology and its application in flue gas moisture recovery, explores the progress of membrane flue gas dehydration technology, and reveals core problem-solving strategies. To effectively promote energy conservation and emission reduction goals in the thermal power industry and provide technical support for building a green and low-carbon energy system.

Keywords: coal fired flue gas; membrane separation; water vapor capture; composite film

引言

随着能源需求的持续增长,燃煤发电在可预见的未来仍将占据重要地位。燃煤过程中产生的烟气含有大量水蒸气以及二氧化硫、二氧化碳、氮氧化物、烟尘等成分。高湿烟气排放不仅加剧环境污染,还导致雾霾频发和区域气候变化^[1]。燃煤机组电厂排烟中水蒸气约占烟气体积分数的 4%~13%,经过湿法脱硫后烟气中水蒸气会达到饱和状态,燃气机组电厂排烟中含有体积分数为 15%~20%的水蒸气^[2]。截至 2025 年 12 月底,中国煤电装机规模约 12.5 亿千瓦,在全国电力总装机容量中的占比为 32.4%。如果火电厂烟气中 10%的水蒸气能够被捕获,那么每年回收的纯净水将超过 2 亿 t,这意味着每年可以节省 33 亿美元^[3]。对烟气里所含的水蒸气进行回收,既能节省水资源,

还能回收烟气中的热能。此外,回收烟气中水分还能使烟气酸露点降低,提升锅炉运行效率,进而防止烟囱腐蚀、降低污染。

2015 年 4 月,国务院颁布《水污染防治行动计划》,对工业水污染防治提出严格考核指标与治理目标。《关于进一步加强水资源节约集约利用的意见》(发改环资〔2023〕1193 号)规定:2025 年,规模以上工业用水重复利用率≥94%;缺水城市再生水利用率≥25%(黄河中下游≥30%,京津冀≥35%);万元工业增加值用水量较 2020 年降 16%。在我国能源布局中,新建燃煤发电项目超 75%新增装机容量集中于西部煤炭主产区,而这些地区普遍缺水,水资源消耗与区域承载能力的矛盾,制约着煤电行业可持续发展。基于此,为契合新型火力发电厂在节能减排方面的需

求,研发并应用膜法对烟气中的水蒸气进行深度回收的技术已刻不容缓。高湿烟气水蒸气回收主要有冷凝法、溶液吸收法和膜法3种较为常用的可行工艺^[4],其中,以间接冷却为核心的冷凝法工艺相对最为成熟,在大规模应用中研究广泛。魏哲等系统综述了该技术路线的原理、系统构成及在大规模电站中应用的关键问题与经济性,指出了其优势是简单可靠,同时也分析了其受限于冷源温度、能耗较高且难以协同回收高品质冷凝潜热等挑战^[5]。冷凝法现阶段相对较为成熟,但回收水量较小,容易腐蚀;相比之下,吸收法除湿有更高的潜力,但该技术路线需构建包含吸收剂再生、热能梯级利用、气液分离在内的多模块耦合系统,导致工艺流程复杂度指数级提升,同时需解决吸收剂降解、溶剂损失等关键技术瓶颈。自20世纪80年代起,膜技术逐渐获得业界的关注,且已在诸多工业领域实现规模化应用。膜技术已经在空气脱湿、天然气的脱水、二氧化碳的捕集、蒸馏脱盐、功能性纺织品的形成和储能方面得到了广泛应用^[6]。近年来,在膜分离技术领域,基于溶解-扩散机制的膜法除湿工艺成为研究热点,其核心原理在于利用致密选择性膜层构建的非对称传质通道。该技术通过膜材料表面功能基团与水分子间的特异性相互作用,在膜两侧形成蒸汽压梯度驱动的跨膜传质过程,从而实现水蒸气和氮气、氧气等气体的分离,并将水蒸气冷凝液化后回收。膜技术已在河北宣化热电厂完成规模化示范(设计规模135万Nm³/h),并于2021年12月通过国家科技部验收,为燃煤电厂烟气水分捕集回收提供了成熟的工程化解决方案。伴随新型膜材料的持续研发,加之新型制膜工艺的进步、膜分离技术的创新发展,膜法脱水系统所具备的占地面积小、能耗低、运行稳定简便、抗腐蚀性强等优势愈发显著,其发展应用前景极为广阔,已然成为未来烟气除湿工艺领域的研究方向。

1 膜法脱湿技术

1.1 膜法脱湿

空气脱湿是日常生产生活中需常态化应对的问题。在精密机械制造、医药生产、食品加工及电子元器件组装等高精度工业领域,环境空气湿度超标会引发金属部件氧化腐蚀、仪表精度下降、电气绝缘性能衰减等工艺缺陷。膜法空气脱湿技术核心机理在于特定高分子材料对水蒸气分子具备高渗透选择性,加压空气流经膜表面时,水蒸气会优先透过,从而实现高效除湿。针对燃煤烟气高温、高湿、多组分的复杂特性,研究人员开发了多种适用于烟气环境的膜材料与工艺系统。例如,采用无机多孔陶瓷膜进行烟气脱水时,膜孔径与工艺系统的匹配对分离效果具有

关键影响,研究表明,2 μ m孔径的陶瓷膜在黏性流动机制下具有较高的渗透通量,而结合渗透气吹扫或吸收剂工艺可显著提升水汽分离效率^[2]。追溯至1987年,Pemsa公司开发的Cactus膜基脱湿分离装置率先实现工业化应用。该系统采用多级膜组件串联工艺,通过优化膜分离单元的组合方式,使水蒸气绝对脱除效率突破99%阈值。至2002年,中国科学院长春应用化学研究所完成大型中空纤维膜组件的工业化研发,其压缩空气脱湿技术通过中试验证,技术指标显示该成果具备替代传统冷冻式干燥设备的市场潜力。

1.2 天然气膜法脱水

自20世纪80年代起,国际学术界开展天然气膜法脱水技术系统性研究,美国、加拿大、日本等工业化国家已实现规模化工程应用。1998年,中国科学院大连化学物理研究所联合中国石油天然气集团研发的膜分离装置,在长庆气田完成工业示范试验,分离效率与运行稳定性均达到工程应用标准。该技术规避了传统净化工艺的局限,具有连续化运行、免再生维护、零二次污染排放、无需添加辅助药剂及耗材等优势,且操作弹性大、设备集成度高、占地面积小,技术经济优势显著,应用前景广阔。用于天然气脱水的核心膜材料,多为聚砜类、醋酸纤维素及聚酰亚胺等高分子聚合物制成的微孔分离膜。基于天然气组分分子尺寸与渗透速率差异,混合气体流经膜表面时,不同组分在膜两侧形成浓度梯度并选择性富集,从而实现高效分离。

2 烟气水分膜法回收研究现状

20世纪90年代后期至21世纪初,美欧在烟气水分回收领域开展科研探索,在近十年完成了从实验室基础研究到中试规模验证的跨越,目前正聚焦全流程工业化放大及工程化应用。美国天然气技术研究院全面推进无机陶瓷膜材料的应用开发;欧洲以荷兰屯特大学及KEMA公司为核心,启动了“CAPWA”项目,并联合14家单位开展研究。而在国内,由华北电力大学陈海平教授领衔的科研团队,是国内率先开展膜法分离技术用于烟气中水分与余热回收研究的课题组。自2010年起,该团队依托复合膜技术,围绕电厂锅炉烟气水分捕集技术,进行了深入研究,并取得了一系列成果。北京林业大学负延滨教授课题组^[7-10]是国内在膜材料及膜分离相关领域精耕细作的核心团队,长期聚焦“复合膜研发-膜组件优化-系统集成”全链条技术攻关,在该领域持续开展理论创新、实验室研发与成果转化相关研究,成功研发出超疏/超亲/双疏膜改性技术等核心成果,形成了从仿生膜材料研发到功能化改性的完整

膜法烟气水分回收技术体系。

2.1 输运膜凝汽器技术

输运膜凝汽器（TMC）技术由 GTI 公司开发，基于无孔膜和多孔膜研究了烟气中的水蒸气输运^[11]。研究结果显示，在适宜的毛细冷凝环境下，纳米多孔陶瓷膜不仅能够实现较高的水蒸气传输速率，还可达成较高的分离效率。在基于纳米多孔陶瓷膜的工艺体系（TMC）中，烟道气中的水蒸气经由选择性渗透膜，随后与低温流体直接接触发生冷凝。通过这种方式，输送的水分及大部分潜热得以有效回收。TMC 技术研究始于 2000 年，经过数 10 年的研究，目前该技术已成功应用于燃气锅炉，并实现了在小型燃气锅炉烟气水分回收领域的商业化应用^[12]。

TMC 技术通过在烟囱前端加装膜分离装置，从而使烟气在中空陶瓷膜内流动，膜外侧引入锅炉补给水。烟气中的水蒸气经多层选择性膜渗透，非凝性气体被截留；渗透水蒸气遇低温锅炉水凝结，同时加热锅炉给水，实现水分高效回收（回收率>85%）及余热梯级利用（热效率约 65%），详见图 1。TMC 技术已经在燃气锅炉上实现商业化运营，其水分回收率在 40%以上，锅炉效率提升 5%^[13]。

2.2 CAPWA 膜法水分回收技术

CAPWA（Capture of Evaporated Water with Novel Membranes）是欧盟资助的膜法烟气水分回收技术，技术核心在于将水分子于空气流包含的各类分子中分离出来。所回收的高纯水可直接用作工艺水，或依需求另作他用。其水分捕集基于选择性渗透膜：烟气通道内设分子筛分膜，仅水分子透过实现分离，水蒸气冷凝后回收。技术核心采用带选择性涂层的中空纤维膜（见图 2），优化孔径与亲水性，提升水蒸气通量与截留率。内部营造真空环境。自然扩散作用会启动以平衡中空纤维内外压力差、使气体分子均匀分散，因薄膜的分子筛选性，纤维内部最终仅存水分子，脱除水分的空气流则排放至外界。

除单一膜技术外，将膜分离与其他单元操作耦合形成混合系统，成为提升整体回收效率与经济效益的前沿方向。例如，Yusoff 等人提出并研究了一种膜蒸馏（MD）与湿式洗涤器（Wet Scrubber）的混合工艺。在该系统中，湿式洗涤器首先对烟气进行预处理并初步回收水分，其排出的湿热气体再进入膜蒸馏单元进行深度脱水与余热回收。这种耦合方式充分发挥了各自单元的优势，被证明能够同步高效地回收水与热量，为处理复杂烟气条件提供了创新的系统解决方案^[14]。

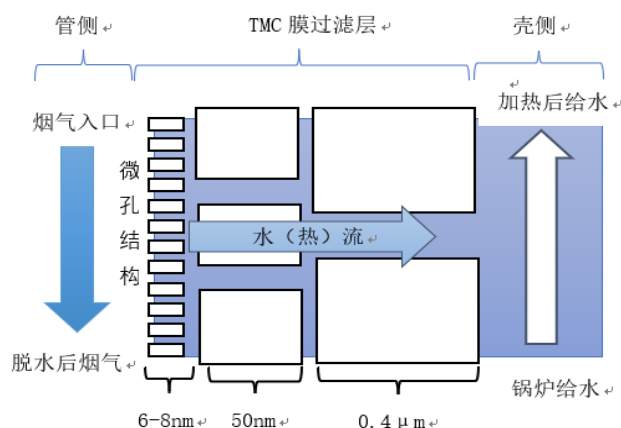


图 1 TMC 膜组件概念图

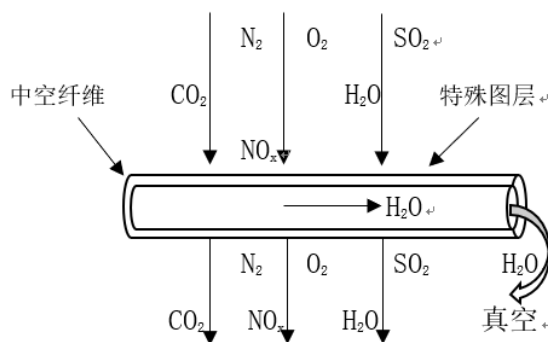


图 2 中空纤维膜表面分子渗透机制图

2.3 中空纤维膜水分回收技术

陈海平等^[15]尝试利用复合中空纤维膜(SPEEK/PES)从氮气和蒸汽的混合物中回收水蒸气,制备了几种不同磺化程度的SPEEK/PES膜。为了从烟气中捕集高纯度的水,复合膜应具有高选择性和亲水性。燃煤电厂烟气以 N_2 ($>70\%$)为主,含 O_2 、 CO_2 及 SO_x 、 NO_x 等污染物。磺化聚醚醚酮(SPEEK)与聚醚醚酮(PES)膜在 H_2O/N_2 体系中表现出高水蒸气渗透通量与选择性,得益于分子链间强相互作用(如氢键)增强的结构致密性。因此,在聚醚醚酮中空纤维膜表面涂覆一层SPEEK可回收烟气中的水蒸气,从而得到水蒸气渗透率高、 H_2O/N_2 选择性高的亲水复合中空纤维膜。兰俊杰^[16]制备了PES/SPEEK中空纤维复合膜,使用扫描电镜(SEM)分析,根据热重和差扫描量热实验,研究结果显示,活性层呈现出均匀的厚度特征,且与多孔支撑层实现了紧密结合。基于此得出,该中空纤维膜具备优良的耐热性能与热稳定性。此中空纤维复合膜在电厂烟气处理领域具有应用潜力,可有效捕集烟气中的水蒸气。杜文韬等^[17]对PES-SPEEK复合膜进行了持久强度实验及拉伸实验研究,结果表明,复合膜在受到的恒定拉力小于或者等于2N时,能够在超过1000h的时间里保持完整;PES-SPEEK复合膜具有良好的机械性能,能够长期在烟道中工作并保持膜的完整性;当烟气中水蒸气的体积分数为15%时,复合膜在回收烟气水蒸气过程中渗透通量约为 $0.042L/m^2 h$;回收水的电导率约为 $4\mu S/cm$,水质好。然而,现有研究存在缺陷:脱除水蒸气时,空气组分亦透过膜层,导致总透气量增加,分离效率降低。

贡延滨团队^[10]基于荷叶仿生学原理构建,借助分子设计手段,成功构建出高分子表面的微米-纳米双重层级结构。膜表面均匀分布着大量微米尺度乳突状结构,每个微米级乳突由多个纳米级小乳突构成。在成膜过程中,借助聚合物于溶剂挥发阶段产生的自组装特性、表面曲率张力效应及热力学相分离机制,于常温常压环境下采用单步溶液浇铸法制备膜层,最终形成具有类荷叶表面微纳结构的超疏水仿生功能涂层(见图3)。核心膜基体选用表面改性有机膜,兼具良好水分分离性能、机械强度及耐高温、耐腐蚀的特性。配套开发的膜法消白反应控制器(SL-MWCR)采用组件化设计,灵活性强。其优势显著:水分渗透系数高、超疏水免维护、耐热适配高温工况、循环水可重复利用,能实现水资源高效回收,在回收烟气水蒸气过程中渗透通量为 $25L/m^2 h$,电导率小于 $100\mu S/cm$ 。

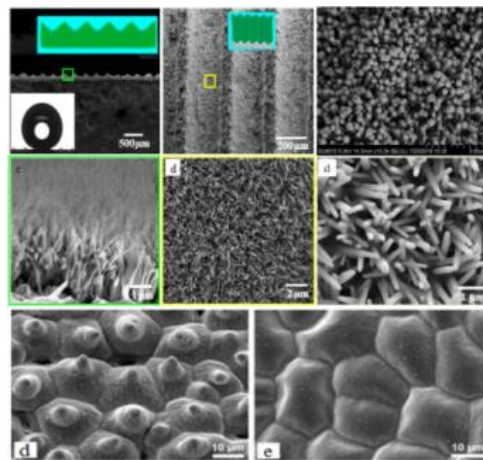


图3 膜材料表面结构图

2.4 无机多孔陶瓷膜技术

无机陶瓷膜因其耐高温、耐腐蚀、易清洗等优点,适用于燃煤烟气环境。滕达等系统研究了基于无机多孔膜的烟气脱水传质特性,对真空膜分离、吹扫膜分离、循环冷却水膜分离以及吸收剂膜分离等各类工艺体系展开对比研究,重点分析了不同体系下渗透通量指标与选择分离系数参数的差异情况。结果表明,吸收剂膜分离系统的性能最优,而渗透气吹扫膜分离在可行性与效果间取得较好平衡^[2]。陈海平团队通过实验研究了不同孔径陶瓷膜的水热回收性能,发现20nm孔径膜因毛细冷凝效应增强而具有较高的水回收效率^[18]。工艺系统的创新对于提升膜法回收效率至关重要。滕达等人进一步针对吹扫气陶瓷膜冷凝器开展了详细的实验研究,系统探究了吹扫气速度、烟气温度等关键操作参数对水热回收性能的影响规律。该研究为吹扫气这一具有良好可行性的工艺路线的设计与优化提供了直接的实验依据和数据支撑^[19]。杜紫薇等进一步将陶瓷膜系统集成于330MW燃煤机组,并耦合热泵进行余热利用,实现年节水23.3万t、节煤677.84t,投资回收期约5.2年,展示了良好的技术经济性^[20]。类似的,米大斌等人在某燃煤电厂开展的陶瓷膜法中试研究,进一步验证了该技术在复杂烟气条件和长期运行下的稳定性,为后续的规模化工程应用提供了重要的运行参数与设计依据^[21]。

3 烟气水分捕集技术现存问题与关键技术

3.1 膜材料的选择和研发问题

膜法捕集水分虽工艺简单、可靠性高、回收水质好,但当前国内外膜材料供应商众多、品类丰富,不同类型的膜材料水分回收性能差异大,且在筛选、制备工艺及运行可靠性等方面仍有问题待深入探究。基于此,需全面细致调研并结合现场实验数据,筛选出适用于火电厂烟气水分

捕集系统，且具耐高温、耐腐蚀及低成本优势的膜材料，对提升系统性能与经济效益意义重大。

在基础膜材料研究框架下，针对膜材料开展复合功能化改性已成为极具创新潜力的研发路径。通过调控膜表面亲疏水特性，结合火力发电厂烟气组分复杂、温湿度波动大等典型特征，定向开发兼具高效分离性能与抗污染特性的功能化膜材料，仍是当前膜分离技术应用的核心攻关方向。

3.2 膜组件的制备和优化问题

针对锅炉烟气中水蒸气的分离需求，研发耐高温、抗腐蚀且低成本的膜组件，需解决膜材料铺展工艺、组件尺寸优化、结构创新设计及高温密封材料等应用中的关键技术问题，此为保障试验顺利开展的前提。

3.3 各因素对水分捕集系统的影响问题

操作参数显著影响膜法水蒸气捕集效能，构建模型阐释机理，结合单因素与正交试验，探究工况与环境交互作用，确定最优操作条件是研究核心。负延滨等^[9]构建了系统完整的传热传质耦合数学模型，通过模型求解与数据分析，精准量化了温度、压力等关键操作参数对目标体系回收效率的影响权重，明确了各参数对回收效率的调控规律与主次关系，优化了后续工艺，提升了回收效率。

3.4 运行期间的维护问题

电厂烟气经脱硫处理后会夹带石膏微粒和烟尘，而膜法捕集系统多布置于脱硫装置后端，微粒沉积结垢将严重威胁系统的运行稳定性。因此，探究微粒结垢机理与动态规律，开发针对性阻垢技术，是保障膜法捕集系统长期稳定高效运行的关键。

3.5 余热的资源化问题

烟气水分捕集与余热资源化的核心是平衡“深度回收”与“成本/能耗”。优先选择适配场景、技术路线，通过防腐材料、智能调控、系统集成突破瓶颈，同时强化运维与标准支撑，可实现能效提升 10%~20%、水回收率 15%~35%、投资回收期 3~5 年的综合效益。

4 结束语

随着国家生态文明建设及“十三五”节水与环保规划推进，火力发电厂用水取水指标趋严、管控加强，节能减排任务加重，膜法深度回收烟气水蒸气技术兴起。该技术较传统工艺，具有工艺简单、可靠性高、回收水质好等优势。但是，膜材料选择、制备工艺及运行可靠性等方面仍有提升空间。因此，研发适应复杂烟气成分的膜材料、制备契合需求的膜组件装置，对推动技术发展意义重大。高效经济的烟气水分捕集技术，可助电厂节水挖潜余热，为

新型电厂建设提供支撑，有望解决烟囱腐蚀和冒“白烟”问题。

课题项目：横向课题“火力发电厂冷却塔蒸发水热回收”，课题编号：GYH-NH-2025-ST-002。国家重点研发计划（自清洁仿生聚合物复合膜规模化制备与优化技术研究，2018YFB0604302-03）。

[参考文献]

- [1]Jia C H,Yan P,Liu P,Li Z.Energy industrial water withdrawal under different energy development scenarios:a multi-regional approach and a case study of China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021(135): 110224.
- [2]滕达,李昂,李铁林,等.基于无机多孔膜气体分离的燃煤机组烟气脱水传质特性分析[J].动力工程学报,2021,41(3):173-181.
- [3]Chen H,Zhou Y,Sun J,Liu Y D,Zhong Y J,Du W T,Lan J J.An experimental study of membranes for capturing water vapor from flue gas[J].Journal of the Energy Institute,2017,90(3):344-351.
- [4]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,2017,26(5):105-110.
- [5]Wei Z,Ji W,Cao X,Yuan Y.Flue gas water recovery by indirect cooling technology for large-scale applications:A Review[J].Journal of Thermal Science,2020,29(5):1223-1241.
- [6]Xu Teng,Zhang Yufeng,Wang Lina,Wang Yajing,Liu Shouxin.Aminating modification of viscose fibers and their CO₂ adsorption properties[J].Journal of Applied Polymer Science,2016,133(1):42840.
- [7]王慢想.氧化锌纳米棒阵列修饰的超疏水材料及其应用[D].北京:北京林业大学,2018.
- [8]张言格.中空纤维膜法回收烟气中水蒸气的性能研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [9]李棒.超疏水膜的制备及其在膜蒸馏处理脱硫废水中的研究[D].北京:北京林业大学,2022.
- [10]李畅.膜接触器 CO₂ 吸收过程中膜润湿行为的实时监测及双疏膜抗润湿性能与机制研究[D].北京:北京林业大学,2026.
- [11]李娜英.燃煤锅炉烟气余热及水分回收的数值研究[D].北京:华北电力大学,2022.
- [12]李祥升.陶瓷复合膜法烟气水分及余热回收利用关键技术研究[D].北京:华北电力大学,2022.

- [13]Xiao L H,Yang M L,Yuan W Z,Zhang T,Liu Z W.Macroporous ceramic membrane condenser for water and heat recovery from flue gas[J].Applied Thermal Engineering,2021(186):116512.
- [14]Yusoff M H M,Nyunt E K,Bilad M R,Mulyati S,Rizal S,Nordin N A H,Leam J J,Khan A L,Jaafar J.Hybrid Membrane Distillation and Wet Scrubber for Simultaneous Recovery of Heat and Water from Flue Gas[J].Entropy,2020,22(2):178.
- [15]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.
- [16]兰俊杰.火电厂排烟中水蒸汽的复合膜捕集技术研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [17]杜文韬,陈海平,周亚男,仲雅娟,兰俊杰.烟气脱水 SPEEK/PES 复合膜的表征及吸附性能[J].热力发电,2014,43(3):83-86.
- [18]Chen H P,Zhou Y N,Cao S T,Li X,Su X,An L S,Gao D.Heat exchange and water recovery experiments of flue gas with using nanoporous ceramic membranes[J].Applied Thermal Engineering,2017(110):686-694.
- [19]Teng,D.;Jia,X.;Yang,W.;An,L.;Shen,G.;Zhang,S.;Zhang, H. Experimental Investigation into Flue Gas Water and Waste Heat Recovery Using a Purge Gas Ceramic Membrane Condenser[J].ACS Omega,2022,7(6):4956-4969.
- [20]杜紫薇,陈海平,黄吉光,等.陶瓷膜法电厂烟气水热回收系统技术经济分析[J].动力工程学报,2022,42(10):967-976.
- [21]Mi Dabin,Guo Jianglong,Zhang Heng.Pilot study of flue gas moisture and waste heat recovery based on ceramic membrane method[J].Electric Power,2021,54(4):199-206.
- 作者简介: 负延滨 (1970—), 毕业于北京化工大学化学工程专业, 当前就职于北京林业大学, 教授。