

# 电吸附技术在电力行业废水处理中的应用

许勇毅<sup>1</sup>, 杨定畅<sup>2</sup>, 王峰<sup>1</sup>, 刘畅<sup>2</sup>, 马岚<sup>2</sup>, 邢浩若<sup>2</sup>, 崔凌霄<sup>3</sup>, 马双忱<sup>2</sup>

(1. 中电华创电力技术研究有限公司, 江苏 苏州 215123; 2. 华北电力大学 环境科学与工程系, 河北 保定 071003;

3. University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, IL, 61820)

**摘要:**传统的废水处理技术面临着系统繁杂, 运行费用高、易结垢和腐蚀等问题, 因此需要采用一种一体化的多功能耦合系统, 兼顾除盐、防垢等功能, 用以除去废水中的污染物。电吸附技术是一种可实现水的净化、淡化的新型水处理技术, 可在低能耗的前提下有效去除水中的杂质离子而不结垢。综述了电吸附理论的发展沿革、电吸附原理和双电层理论要点、电吸附结构及其工作流程等, 介绍了几种主要的电吸附材料及其优缺点。基于日趋严格的环保要求, 电吸附技术以其低能耗、低成本、无二次污染等优势, 可望在电力行业得到较广泛的应用。

**关键词:**电吸附; 电力行业; 废水处理; 应用进展

中图分类号: TQ534

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2021)03-0138-09

## Application of electro-adsorption technology in wastewater treatment of electric power industry

XU Yongyi<sup>1</sup>, YANG Dingchang<sup>2</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>, MA Lan<sup>2</sup>,

XING Haoruo<sup>2</sup>, CUI Lingxiao<sup>3</sup>, MA Shuangchen<sup>2</sup>

(1. China Power Hua Chuang Electricity Technology Research Company Ltd., Suzhou 215123, China; 2. Department of

Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

3. University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, IL, 61820)

**Abstract:** Traditional water treatment technology is still faced with many problems, such as complex system, high operating cost, easy scaling and corrosion. Therefore, it is necessary to adopt an integrated multi-functional coupling system, which can take into account the functions of desalination and anti-scaling to remove the pollutants in the wastewater. Electro-sorption technology is a new water treatment technology for water purification and desalination, which can effectively remove impurity ions from water without scaling under the premise of low energy consumption. In this paper, it was summarized the development history of electro-sorption theory, the principle of electro-sorption and the main points of electric double layer theory, the structure of electro-sorption and its working process, etc. At the same time, several main electro-sorption materials and their advantages and disadvantages were introduced. Based on increasingly strict environmental protection requirements, electro-sorption technology is expected to be widely used and developed in the power industry due to its technical advantages such as low energy consumption, low cost and no secondary pollution.

**Key words:** electro-adsorption; power plants; wastewater treatment; application progress

## 0 引言

我国水资源较为丰富, 但由于人口基数大, 人均淡水资源占有量仅为世界人均淡水资源占有量的

1/4, 是全国 13 个水资源紧缺国家之一<sup>[1]</sup>。电厂耗水量大, 每年废水的排放量巨大, 若直接排放未达标的废水, 会污染土壤、地表水和地下水等, 危害人类健康。2015 年, 国务院发布了《水污染防治行动计划

收稿日期: 2020-02-12; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.20021201

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YF060430X)

作者简介: 许勇毅(1982—), 男, 安徽黄山人, 高级工程师, 主要从事发电行业环境保护技术研究。E-mail: sos245281@sina.com。通讯作者: 马双忱, 教授, 主要从事燃煤电厂烟气脱硫脱硝、废水处理技术等方面研究。E-mail: msc1225@163.com

引用格式: 许勇毅, 杨定畅, 王峰, 等. 电吸附技术在电力行业废水处理中的应用[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 138-146.

XU Yongyi, YANG Dingchang, WANG Feng, et al. Application of electro-adsorption technology in wastewater treatment of electric power industry[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 138-146.



移动阅读

划》(即“水十条”)[2],明确提出全面控制水污染物排放;2018年修编的《发电厂废水治理设计规范》对水收集和贮存等设施的相关设计提出了要求,采取废水零排放处理。

火电厂废水的水质、水量差异大,废水中的污染物以无机物为主,且间断性排水较多。电厂中的废水主要包括脱硫废水、设备冲洗排水、冲灰废水和含油废水等,废水处理方法一般为曝气氧化、酸碱中和与混凝澄清。在正式开始实施的《火电厂污染防治可行技术指南》中,明确针对脱硫废水制订了具体的处理方法,并在废水近零排放技术中强调,除脱硫废水外,各类废水经处理后基本能实现“一水多用,梯级利用”、废水不外排,因此,实现废水近零排放的重点是实现脱硫废水零排放[3]。近年来,电吸附技术(Electro adsorption technology, EST),又称电容去离子技术(Capacitance deionization, CDI)引起了广泛关注[4]。本文综述了电吸附的发展沿革,介绍了电吸附原理、结构、吸附材料及发展趋势。

## 1 电吸附技术

电吸附技术是利用带电电极表面吸附水中离子及带电离子,使水中物质在电极表面浓缩富集,从而实现高效、节能的低盐或中盐水淡化技术[5]。电吸附过程分为吸附过程和脱附过程2部分,其原理如图1所示[6]。处理水通过多孔电极时,会受到系统施加的电场力,当电极上的带电电荷进入溶液中时,溶液中的离子被重新分布与排列;同时,在库仑力作用下,带电电极与溶液界面被反离子占据,界面剩余电荷的变化会引起界面双层电位差的变化,从而在电极和电解质界面形成致密的双电层(Electric double layer, EDL)[7]。溶液中阴阳离子逐渐迁移到极性相反的电极板上,离子被吸附在材料表面,达到脱除污染物的目的。随着反应的进行,吸附在电极表面的离子达到饱和,需对吸附材料进行脱附再生[8]。一般采取极性对调或短路的方式进行脱附,使吸附在材料表面的离子通过电场的排斥作用被释

放到溶液中,最终生成浓水排出,实现脱附[9]。

## 2 电吸附基本理论

### 2.1 电极吸附材料

吸附材料以碳材料为主,具有吸附容量大、再生效果好、低价易得等优点[10]。常用的电极材料包括活性炭、石墨烯、碳气凝胶等[11]。优良的电极吸附材料应具有较大的比表面积、正常工作时具有良好的化学稳定性、离子在孔径中的迁移率高、电子在电极材料内具有很好的传导性、多孔电极和集电器之间的接触电阻低、良好的润湿性、低成本和可扩展性、良好的可加工性、较大的比表面积、高生物惰性[12]。

#### 1) 活性炭和活性炭布

活性炭(Activated carbons, ACs)是使用最广泛的多孔碳,其用途已在20世纪六七十年代电容去离子技术早期研究中得到证实。由树脂衍生的丙烯酸酯(ACs)可用于珠状、纤维或整料的合成,其他多数的ACs通常是微米级颗粒组成的粉末,如将聚丙烯腈(Polyacrylonitrile, PAN)和导电添加剂(炭黑)混合可制得微米碳纤维[13]。孔隙结构[14]是活性炭的最重要特征,通过提高总孔体积/比面积的比值,可增大盐吸附容量。

#### 2) 有序介孔碳

有序介孔碳(Ordered mesoporous carbons, OMCs)具有高度周期性的六角形或立方排列的介孔,可通过软模板或硬模板得出。对于硬模板,如沸石或有序介孔二氧化硅,用碳前体渗透后碳化,最后化学除去初始模板(如使用氢氟酸)得到OMCs;软模板是较新型的OMCs材料合成方法,其涉及三嵌段共聚物的自组装和热去除,最后留下的唯一固相碳保留了模板的有序多孔特征[15-16]。

#### 3) 碳气凝胶

碳气凝胶(Carbon aerogels, CAs)结合了5-磺基水杨酸(Sulphosalicylic acid, SSA)(比表面积通常为 $400 \sim 1\ 100 \text{ m}^2/\text{g}$ ,最高达 $1\ 700 \text{ m}^2/\text{g}$ )[17]具有高导电率( $25 \sim 100 \text{ S}/\text{cm}$ )和低质量密度( $<0.1 \text{ g}/\text{mL}$ )[18]等优点。大部分SSA与中间孔隙(介孔)有关,根据不同的合成条件,也可能存在与颗粒内孔隙度相关的微孔[19],其比表面积从 $10 \text{ m}^2/\text{g}$ 或更低,到超过 $600 \text{ m}^2/\text{g}$ [20]。与乙酸纤维相比,基于碳干凝胶的电容去离子电极,合成后的初始孔隙率显著降低[21]。碳气凝胶和干凝胶在介孔范围内的孔径对于离子存储最佳,因为电双层不重叠[22]且介孔尺寸便于离子传输。因此适用于CDI应用。

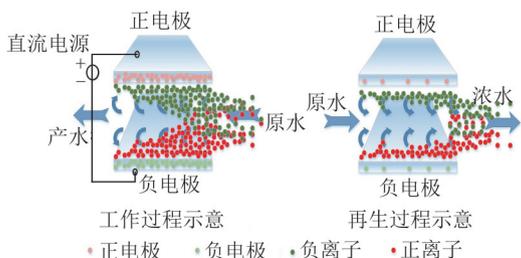


图1 电吸附与脱附原理示意[6]

Fig.1 Schematic diagram of electrical adsorption and desorption[6]

#### 4) 碳化物衍生的碳

与 ACs 不同,碳化物衍生的碳 (Carbide-derived carbons, CDCs) 只有极窄分布的微孔,没有介孔,与 OMCs 不同,CDCs 中的小孔未以一种或多种方式排列。CDCs 采用高温(200 °C)下干燥氯气中通过蚀刻碳化物粉末生成,氯处理后进行氢气退火除去残留的氯化物,生成的 SSA 比表面积在 1 200~2 000 m<sup>2</sup>/g,活化后增至 3 200 m<sup>2</sup>/g<sup>[23]</sup>。目前,来自碳化钛(TiC-CDC)的 CDCs 的 CDI 容量已被开发为孔径小于 1 nm 的纯微孔材料<sup>[24]</sup>,其前微孔是限制离子传输的主要因素。

#### 5) 碳纳米管和石墨烯

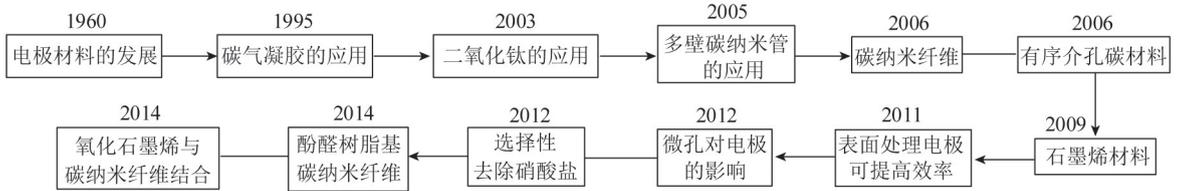


图2 CDI材料的发展历程

Fig.2 Development history of CDI materials

## 2.2 电吸附数学模型

### 2.2.1 经典模型

#### 1) 紧密层模型(Helmholtz-Perrin 模型)

固液相界面电荷分布模型,即 Helmholtz-Perrin 模型,最早于 19 世纪由 Helmholtz 和 Perrin 提出<sup>[26]</sup>。整个模型类似于一个平板电容器,一个平板上带正电荷,另外一个平板上带负电荷。双电层模型如图 3 所示,其中, $q_M$ 为固体中的电荷量, $q_S$ 为液体中的电荷量。

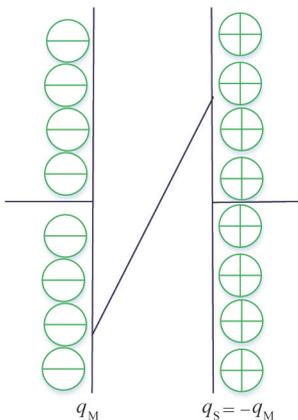


图3 Helmholtz 平板电容器模型示意

Fig.3 Schematic diagram of Helmholtz flat capacitor model

#### 2) 分散层模型(Gouy-Chapman 模型)

20 世纪初提出了分散层模型(Gouy-Chapman 模型)<sup>[27-28]</sup>,该模型认为距固相界面的距离越小,反电荷越多;随着距离增加,反电荷越少。分散层中电

碳纳米管(Carbon nanotubes, CNTs)和石墨烯作为 CDI 电极材料,其表面区域均可进入,这主要是由于该区域位于材料外侧,与 ACs 相反(几乎整个吸附区域在颗粒内)。

#### 6) 炭黑材料

炭黑(Carbon black, CB)是具有低的比表面积(通常<120 m<sup>2</sup>/g)、高导电性的致密碳纳米颗粒<sup>[25]</sup>,是常见的导电添加剂。将 CB 添加到由 AC 制成的 CDI 薄膜电极后,可显著去除含有 670、1 000 mg/L NaCl 盐水电解质中的盐,但非常低的比表面积限制了纯粹由 CB 颗粒组成电极的 CDI 性能。图 2 为 CDI 材料的发展历程。

位  $\varphi_x$  与距离固相电极表面的距离呈指数关系,如图 4 所示。

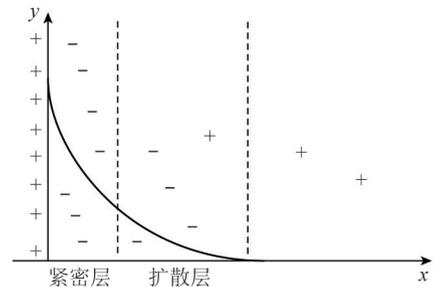


图4 Gouy-Chapman 扩散双电层模型示意

Fig.4 Schematic diagram of Gouy-Chapman diffusion double-layer model

#### 3) GCS 双电层模型(Gouy-Chapman-Stern 模型)

1924 年, Stern 提出了一种改进的 GCS 模型<sup>[29-30]</sup>。该模型不再将扩散粒子看作点电荷,而将液相电荷以 OHP/IHP 位置为分界线分为 2 部分。Stern 面内的电荷分布遵循 Helmholtz-Perrin 模型的规律和特征方程,电势从  $\varphi_0$  直线下降到  $\varphi_H$ ; Stern 面外的电荷分布遵循 Gouy-Chapman 模型的规律和特征方程,电势从  $\varphi_H$  指数形式下降到 0,如图 5 所示。

### 2.2.2 现代双电层模型

#### 1) Grahame 模型

1947 年, Grahame 基于上述经典模型给出了更

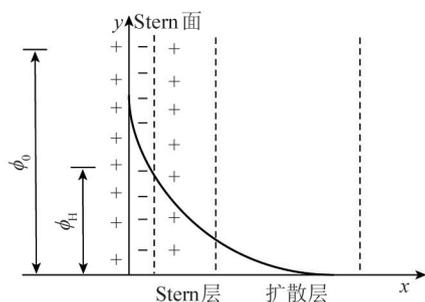


图5 Stern模型示意

Fig.5 Schematic diagram of Stern model

加完善的双电层模型<sup>[31-32]</sup>,将内层分为2层:一层为介电常数仅为6的内Helmholtz层;另一层为含有水化离子的外Helmholtz层,如图6所示。

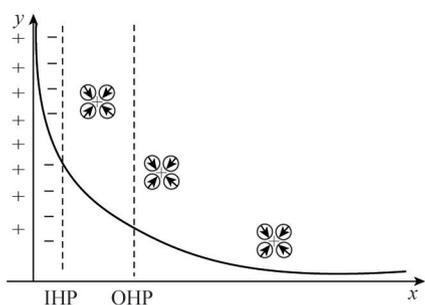


图6 Grahame模型示意

Fig.6 Schematic diagram of Grahame model

## 2) 微孔区双电层模型

2002年Ying等<sup>[33]</sup>研究了碳气凝胶对水溶液中离子的电吸附行为,在Grahame和Parsons等理论及其自主试验研究基础上开发出了基于微孔区的双电层模型。

## 3) 纳米材料孔内双电层模型

2006年Hou<sup>[34]</sup>研究了纳米结构碳基材料孔内形成的双电层基本机理,发现可以通过增大孔径、溶液浓度和外加电压来降低双层重叠效应对电吸附电容的影响。

## 2.3 电吸附结构

电吸附装置包括一对多孔电极、隔板(开放的通道或多孔介质材料)以及吸附材料。多孔电极对带有施加的电压差为1.0~1.4 V(又称电池电压或充电电压)<sup>[35]</sup>。电极所携带的电荷不仅吸附携带反电荷的离子,同时还需排斥同电荷离子,使吸附效率较低。为避免此问题发生,通常会在传统装置的基础上加入阴、阳离子交换膜,该装置又称为膜电容去离子技术(Membrane capacitive deionization, MCDI)<sup>[36]</sup>。电吸附装置结构如图7所示。

## 2.4 电吸附工作流程

浓水由底部的进水口进入、顶部的出水口流出,使溶液在系统内充分吸附。浓水进入系统后,在电

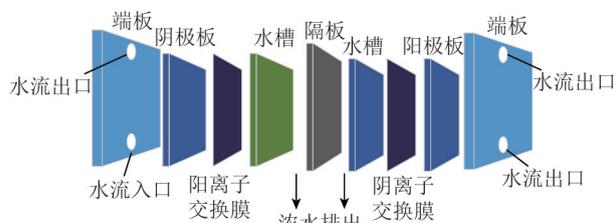


图7 MCDI装置结构

Fig.7 MCDI device structure

场力驱动下,阴阳离子定向移动;同时,阴、阳离子交换膜筛分离离子,最终吸附在材料表面,达到去除盐离子的目的,该过程称为电吸附过程<sup>[37]</sup>。此后通过改变外部电源或极性反转实现放电,此时盐离子从吸附材料中分离,汇入溶液中,生成的浓水被排至浓水池集中处理,此过程称为脱附再生过程<sup>[38]</sup>。电吸附工作过程如图8所示。

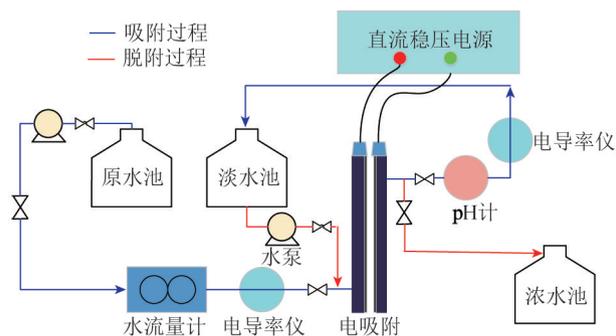


图8 电吸附工作过程示意

Fig.8 Schematic diagram of the working process of electric adsorption

虽然电吸附技术在水处理领域得到迅速发展,但目前仍缺乏突破性的电吸附理论研究,对电吸附机理与模型的深入研究是实现技术突破的关键,也对未来电化学领域研究具有指导性意义。由于电吸附技术稳定性较差、运行周期短、电流效率低、电极电阻较大等问题,未能在水处理方向得到大规模应用,为此可从以下2方面改进:① CDI反应器优化设计。研制结构特殊的CDI反应器,通过增大反应器的电极表面,强化传质,提高反应器的时空产率等来优化CDI反应器。② 选择合适的电吸附材料。寻找导电性能强、比表面积大、稳定性高、成本较低、具有选择性能的吸附材料。

## 2.5 电吸附技术与其他技术比较

除电吸附技术外,电除尘和电渗析技术均是重要的电化学技术。电除尘工作过程如图9所示<sup>[39]</sup>。电除尘技术与电吸附技术分别用于气相与液相带电颗粒(离子)的分离,若电除尘与布袋除盐器结合,相当于气相的电吸附装置。但电除尘相比于电吸附,只对离子进行迁移而未收集。

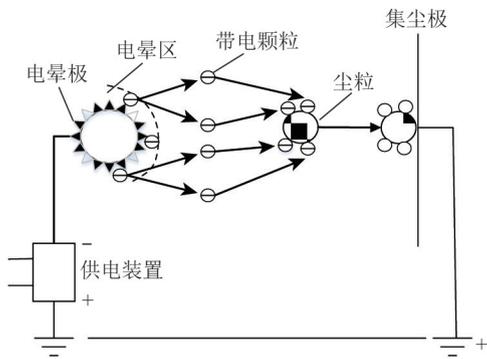


图9 电除尘器除尘流程

Fig.9 Dust removal flow chart of ESP

电渗析(ED)工作原理如图10所示<sup>[40]</sup>,其具有能量消耗少、药剂耗量少、环境污染小、设备简单操作方便、除盐浓度适应大、用电较易解决和运行成本较低等优点。但与电吸附技术相比,电渗析装置组装难度大,脱盐无法分离难以解离或解离度小的物质,因此还需要后续处理,且设备易产生极化结垢和中性扰乱,导致除盐效率下降。

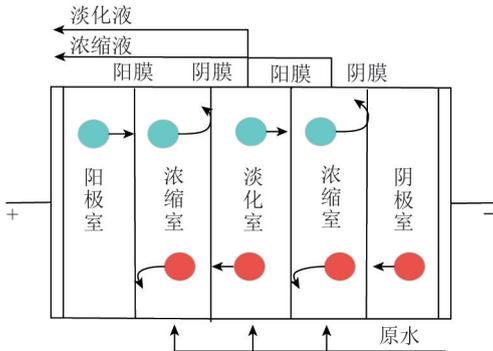


图10 电渗析原理

Fig.10 Principle of electrodialysis

综上,与其他技术相比,电吸附技术的优势突出:

#### 1) 吸附量大

应选取比表面积较大的吸附材料,本身即具有较好的吸附容量。通电后,会在吸附材料表面形成双电层,双电层的扩散层被压缩,电荷密度增大,反离子需求量增加,使更多的离子聚集到双电层中<sup>[41]</sup>。在电场力作用下,离子的迁移速率增大,使离子更易被吸附在材料上。此外,通电后吸附材料的吸附容量比未通电的吸附材料大5~10倍<sup>[42]</sup>。

#### 2) 成本较低

电吸附工艺装置投资略高于热法和膜法工艺装置,但在后续的运行过程中,减少了加药费用及膜更换费用。由于吸附材料一般选取廉价易得的碳材料,该材料具有较好的稳定性,无需频繁更换。

#### 3) 无需加药,无二次污染

在整个过程中,不添加药剂,即可实现对水中盐分进行脱除,节约成本,且可避免不必要的杂质<sup>[43]</sup>。电吸附系统本身不产生新的排放物,避免了二次污染。

#### 4) 操作灵活

若实现吸附与脱附过程之间的切换,仅需电极倒换;处理水量及排放水浓度均可根据需要进行调控。

#### 5) 耐受性强

电吸附装置核心部件使用寿命长,不需经常更换部件,运行成本较低。

综上,在电力行业废水处理与污染水再利用领域,电吸附技术具有明显的技术优势和经济优势。因此,将电吸附技术用于废水处理具有良好的发展潜力。

### 3 电吸附技术在电力行业的应用

电吸附技术具有诸多优势,广泛应用于海水淡化、电厂循环冷却排污水、煤矿矿井水、工厂印染废水和脱硫废水等领域。

#### 3.1 循环冷却排污水处理

循环冷却排污水在工业用水中占较大比重,广泛应用于电力、石油和钢铁等行业。电厂循环冷却排污水水量大、含盐量高、余热大、有毒物质多,对环境危害大。若不对其进行处理,会使循环冷却水系统的设备发生结垢和腐蚀,影响生产过程。

利用电吸附技术处理循环冷却排污水是缓解水资源紧缺的有效手段。Ma等<sup>[44]</sup>以实际循环冷却排污水为研究对象,在最佳试验条件下,探究脱盐性能和主要离子去除效果,研究表明电吸附技术对电厂循环冷却排污水脱盐处理效果良好。李永辉<sup>[45]</sup>对循环冷却水进行电吸附脱盐试验,表明该技术对Cl<sup>-</sup>和Ca<sup>2+</sup>去除效率好,出水能够满足开式循环冷却水的要求。Shen等<sup>[38]</sup>针对电厂循环水系统的排污水盐分含量、产水量大且回用难等问题,将电吸附技术应用于废水脱盐再利用领域,研究结果表明整个电吸附试验装置可实现连续稳定运行,对电厂循环排污水初级脱盐处理具有良好的可行性。

#### 3.2 脱硫废水处理

《火电厂污染防治技术政策》对电厂废水处理设计进行了明确规定,由于脱硫废水成分复杂、含盐量高、腐蚀性强、含有复杂重金属物质等,脱硫废水零排放是当前电力环保的重点<sup>[46-47]</sup>。

电吸附技术具有操作灵活性高(可根据水质要求灵活控制出水水质)、可吸附容量大、无需加药及自动化程度高等特点<sup>[48]</sup>,电吸附电极通常由高孔炭

材料组成<sup>[49]</sup>。与反渗透和蒸馏不同,电吸附工艺无需高压或高温,可在室温、连续水流作用下施加小电压运行<sup>[50]</sup>。与电渗析相比,该技术未采用离子交换膜,因此不会发生膜堵塞问题,对进水水质要求不高。与膜法浓缩减量相比,无需更换膜、运行成本低、不易结垢和堵塞<sup>[51]</sup>。与烟气蒸发浓缩技术对比,电吸附不易结垢;烟气浓缩塔酸性较强,极易对设备造成腐蚀,而电吸附由于无需加药以及无二次污染等特点,可避免此类现象发生<sup>[52]</sup>。此外,在电厂尾部无足够空间搭建额外脱硫废水处理装置时,电吸附占地空间小,可有效解决此问题。因此,利用电吸附技术作为脱硫废水的减量单元,具有较大的优势和广阔的应用前景<sup>[53]</sup>。电吸附技术构建的脱硫废水零排放工艺流程如图 11 所示,经三联箱处理后的脱硫废水,首先进入微滤系统,去除水中残留的悬浮物;然后进入电吸附装置,脱除水中盐分,产生的淡水返回脱硫塔回收利用,浓水可进入旁路烟道一并处理或电解生成杀菌剂用于循环冷却水中。该系统将电吸附作为旁路烟道蒸发技术的前处理单元,耦合了膜法处理、电吸附、烟道蒸发技术优势,实现集成创新。

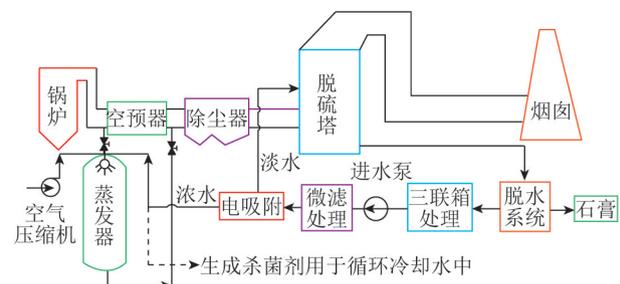


图 11 电吸附技术应用于脱硫废水零排放工艺概念

Fig.11 Application of electric adsorption technology to the concept of zero-discharge process of desulfurization wastewater

利用水中的 COD 和氨氮(其形态与 pH 值有关)以带电离子形态存在的特点,潘利祥等<sup>[54]</sup>采用电吸附深度处理废水,试验结果表明:处理后脱硫废水中的 COD、氨氮及重金属离子浓度降低,可实现部分废水的循环利用。

## 4 电吸附技术国内外发展

电吸附技术概念是由 Blair 和 Murphy 在 1960 年首次提出<sup>[55]</sup>。20 世纪 70 年代,Johnson 和 Newman 以多孔碳制作成吸附模型,得出决定电吸附吸附量的相关技术,包括电极表面积,施加的电压大小以及双电层电容等<sup>[56]</sup>。20 世纪 90 年代中期,美国 Lawrence Livermore 国家实验室将碳气凝胶将作为吸附电极应用于建立的电吸附模型中<sup>[57]</sup>。与

初期缓慢的发展形成对比,近几十年电吸附技术飞速发展,在装置结构、离子交换膜、电极材料等方面取得巨大进步,电吸附受到广泛关注<sup>[58]</sup>。

最初电吸附装置进水方式是串联,供电方式是并联,导致通道里的管道呈蛇形分布,每对电极分开单独供电<sup>[57]</sup>。目前进水方式和供电方式相反,进水方式为并联,供电方式为串联,装置为直通式,水下进上出,串联供电,电能以离子形式储存在电吸附装置中,因此可将电吸附装置作为一个电容器,能量在内部回收,减少能量消耗。

20 世纪 90 年代中期是电吸附技术产业化研究和使用的起步阶段。1996 年,美国 Lawrence Livermore 国家实验室研发了完整的电吸附系统,这是历史上第 1 套电吸附应用装置<sup>[57]</sup>。1999 年,Bio-source 公司开发出一套电吸附装置,用于海水淡化,为军方所用<sup>[58]</sup>。2003 年,Enpar 公司(加拿大)研制出新型电吸附装置,可选择性去除水中的铵根离子和硝酸根离子<sup>[59]</sup>。

21 世纪初,我国开始进行电吸附技术的产业化研究,孙晓慰组建的爱思特净化设备有限公司于 2001 年研制出一套电吸附除盐装置,这是我国的第 1 套电吸附实用装置,在此基础上,开发了一系列的电吸附除盐装置,对于饮用水的进一步净化和工业废水处理起到了积极作用<sup>[60]</sup>。目前,国外的电吸附技术应用规模较小,电吸附装置流量仅为几十 L/h。2006 年 12 月,我国研发了大型电吸附装置,这是首套用于污水处理装置,已在齐鲁石化投产,处理流量为 100 t/h<sup>[61]</sup>。2007 年 7 月,国内首套万吨级大型污水处理电吸附装置在太原化学工业集团有限公司建成,出水作为工艺用水、锅炉补充水等。

基于电吸附技术环境友好的特点,可进一步与绿色能源相结合(如光伏发电等);其能耗低,具有向小型化便携式发展的趋势。未来电吸附技术将向工艺优化、高比表面积、高比电容、低成本和易制造的电极材料等方向发展。

电吸附处理技术仍存在诸多缺陷(使用周期短、稳定性差、电极电阻较大、电流效率低、电极材料成本较高以及电催化活性等),制约了其大规模应用。今后应从以下 3 个方面改进:

1) 作为电吸附系统中最重要的重要组成部分,吸附材料的吸附容量是研究重点。提高吸附容量将大幅提高系统的除污能力,减少再生频次。此外,吸附材料的再生效果即材料的稳定性也会影响系统使用寿命。

2) 结构特殊的电吸附系统可通过增大反应器

比电极面积,强化传质,提高反应器的时空产率,完成系统优化。

3)电吸附水处理技术无法对某些污染物进行同时净化,因此可将其与其他水处理技术集成或采用催化电极材料。与国外技术发展相比,国内电化学水处理技术的研究尚缺乏系统性,在反应器优化设计与功能耦合方面尚有较大差距。

## 5 结 语

以电吸附为核心的一体化多功能耦合系统,兼顾除盐、防垢等功能,可用高效、低能耗去除废水中污染物,在电力行业具有广阔的应用前景。由于目前电吸附技术在电力行业中处于初步探索阶段,电吸附机理、预测模型、吸附材料等方面尚需进一步研究。尤其是在处理脱硫废水方面,由于脱硫废水水质复杂,盐浓度相对较高,仅依靠吸附材料很难有效净化,因此还需耦合其他技术。

## 参考文献(References):

- [1] 刘铖.基于专利分析的我国海水淡化技术及产业发展建议[D].天津:天津大学,2016.  
LIU Cheng. Suggestion for technology and industrial development of desalination based on the results of the patent analysis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [2] 国务院.水污染防治行动计划[EB/OL].(2015-04-02)[2020.5.8]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm?\\_gs\\_wss=tsina\\_635647798845158909](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm?_gs_wss=tsina_635647798845158909).  
State Council. Action Plan for Water Pollution Control [EB/OL]. (2015-04-02) [2020-05-08]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm?\\_gs\\_wss=tsina\\_635647798845158909](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm?_gs_wss=tsina_635647798845158909).
- [3] 刘海洋,江澄宇,谷小兵,等.燃煤电厂湿法脱硫废水零排放处理技术进展[J].环境工程,2016,34(4):33-36.  
LIU Haiyang,JIANG Chengyu,GU Xiaobing,et al. Development of zero liquid discharge technologies for desulfurization wastewater from coal-fired power plant [J]. Environmental Engineering, 2016,34(4):33-36.
- [4] ANDERSON M A,CUDERO A L,PALMA J. Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: Will it compete? [J]. Electrochimica Acta, 2010, 55 (12): 3845-3856.
- [5] SUSS M E,PORADA S,SUN X,et al. Water desalination via capacitive deionization [J]. Energy Environ. Sci., 2015, 8 (8): 2296-2319.
- [6] 蒋涛,王付超,李欲如,等.废水处理中的电吸附技术及应用[J].水能经济,2015(3):76-78.  
JIANG Tao,WANG Fuchao,LI Xiru,et al. Application of electro-sorption technology in advanced treatment of papermaking wastewater[J]. Water Research, 2015(3):76-78.
- [7] AGARTAN L,AKUZUM B,MATHIS T,et al. Influence of thermal treatment conditions on capacitive deionization performance and charge efficiency of carbon electrodes[J]. Separation and Purification Technology, 2018, 202:67-75.
- [8] 胡承志,刘会娟,曲久辉.电化学水处理技术研究进展[J].环境工程学报,2018,12(3):677-696.  
HU Chengzhi,LIU Huijuan,QU Jiuhui. Research progress of electrochemical technologies of water treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(3):677-696.
- [9] 张瑞,赵霞,李庆维,等.电化学水处理技术的研究及应用进展[J].水处理技术,2019,45(4):11-16.  
ZHANG rui,ZHAO xia,LI qingwei,et al. Research and application progress of electrochemical technology in wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(4):11-16.
- [10] 张思韬,韩严和,张晓飞,等.用于处理工业废水的电极材料研究进展[J].工业水处理,2019,39(11):1-6.  
ZHANG Sitao,HAN Yanhe,ZHANG Xiaofei,et al. Advances in research on electrode materials for industrial wastewater treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(11):1-6.
- [11] NIGHTINGALE E R J. Phenomenological theory of ion solvation effective radii of hydrated ions [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1958, 63(9):566-567.
- [12] 吴旭冉,贾志军,马洪运,等.电化学基础(Ⅲ)—双电层模型及其发展[J].储能科学与技术,2013,2(2):152-156.  
WU Xuran, JIA Zhijun, MA Hongyun, et al. Fundamentals of electrochemistry (Ⅲ): Electrical double layer model and its development [J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2 (2): 152-156.
- [13] WANG G,DONG Q,LING Z,et al. Hierarchical activated carbon nanofiber webs with tuned structure fabricated by electrospinning for capacitive deionization [J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(41):21819-21823.
- [14] WANG G,QIAN B,DONG Q,et al. Highly mesoporous activated carbon electrode for capacitive deionization[J]. Separation & Purification Technology, 2013, 103:216-221.
- [15] ZHAI Y,DOU Y,ZHAO D,et al. Carbon materials for chemical capacitive energy storage[J]. Advanced Materials, 2011, 23 (42):4828-4850.
- [16] OSCHATZ M,LEE J T,KIM H,et al. Micro- and mesoporous carbide-derived carbon prepared by a sacrificial template method in high performance lithium sulfur battery cathodes [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 41: 17649-17654.
- [17] YANG C M,CHOI W H,NA B K,et al. Capacitive deionization of NaCl solution with carbon aerogel-silicagel composite electrodes[J]. Desalination, 2005, 174(2):125-133.
- [18] OREN Y. Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment: Past, present and future (a review) [J]. Desalination, 2008, 228(1/3):10-29.
- [19] MORENO-CASTILLA C, MALDONADO-HÓDAR F J. Carbon aerogels for catalysis applications: An overview [J]. Carbon, 2005, 43(3):455-465.
- [20] YOSHIZAWA N, HATORI H, SONEDA Y, et al. Structure and

- electrochemical properties of carbon aerogels polymerized in the presence of  $\text{Cu}^{2+}$  [J]. *Journal of Non Crystalline Solids*, 2003, 330(1/3):100-105.
- [21] LANDON J, GAO X, KULENGOWSKI B, et al. Impact of pore size characteristics on the electrosorption capacity of carbon xerogel electrodes for capacitive deionization [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2012, 159(11):1861-1866.
- [22] CHRISTOPHER J Gabelich, PEI Xu, YORAM Cohen. Chapter 10 concentrate treatment for inland desalting [J]. *Sustainability Science & Engineering*, 2010, 2(9):295-326.
- [23] PRESSER V, HEON M, GOGOTSI Y. Carbide-derived carbons—from porous networks to nanotubes and graphene [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(5):800-833.
- [24] PORADA S, SCHIPPER F, ASLAN M, et al. Capacitive deionization using biomass-based microporous salt-templated heteroatom-doped carbons [J]. *Chemsuschem*, 2015, 8(11):1867-1874.
- [25] STOECKLI F, GUILLOT A, SLASLI A M, et al. Microporosity in carbon blacks [J]. *Carbon*, 2002, 40(2):211-215.
- [26] 许春玲, 张小勇. 电容吸附法脱盐技术研究进展 [J]. *广州化工*, 2011, 39(12):17-19.  
XU Chunling, ZHANG Xiaoyong. Research progress of capacitance adsorption desalination technology [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2011, 39(12):17-19.
- [27] 贾景超, 杨庆. Gouy-Chapman 双电层模型在蒙脱石长程膨胀中应用 [J]. *大连理工大学学报*, 2010, 50(2):239-244.  
JIA Jingchao, YANG Qing. Application of gouy-chapman double layer model to long-range swelling of montmorillonite [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2010, 50(2):239-244.
- [28] 徐文东, 陈进富, 李术元. 高表面活性活性炭电极的制备及其在双电层电容器中的应用 [J]. *现代化工*, 2004(24):55-58.  
XU Wendong, CHEN Jinfu, LI Shuyuan. Preparation of high surface area active carbon electrode and its application in electric double layer capacitor [J]. *Modern Chemical Industry*, 2004(24):55-58.
- [29] 徐艳辉, 耿海龙. 电极过程动力学: 基础、技术与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.  
XU Yanhui, GENG Hailong. *Electrode process dynamics: Fundamentals, technology and applications* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [30] OLDHAM K B. A Gouy-chapman-stern model of the double layer at a (metal)/(ionic liquid) interface [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2008, 613(2):131-138.
- [31] 丁宁, 王晓琳. 膜动电现象的研究进展 [C]// 第一届全国化学工程与生物化工年会. 南京: 南京工业大学, 2004.  
DING Ning, WANG Xiaolin. Research progress of membrane electrokinetic phenomena [C]// 1<sup>st</sup> Chinese National Chemical and Biochemical Engineering Annual Meeting. Nanjing: Nanjing Tech. University, 2004.
- [32] 王建, 营爱玲. 表界面现象及双电层模型 [J]. *连云港化工高等专科学校学报*, 2000(1):13-15.  
WANG Jian, YING Ailing. Surface interface phenomenon and double electric layer model [J]. *Journal of Lianyungang Chemical College*, 2000(1):13-15.
- [33] YING T Y, YANG K L, YIACOUMI S, et al. Electrosorption of ions from aqueous solutions by nanostructured carbon aerogel [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2002, 250(1):18-27.
- [34] HOU C H, LIANG C, YIACOUMI S, et al. Electrosorption capacitance of nanostructured carbon-based materials [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2006, 302(1):54-61.
- [35] AVRAHAM E, NOKED M, SOFFER A, et al. The feasibility of boron removal from water by capacitive deionization [J]. *Electrochimica Acta*, 2011, 56(18):6312-6317.
- [36] JEON S I, PARK H R, YEO J G, et al. Desalination via a new membrane capacitive deionization process utilizing flow-electrodes [J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(5):1471-1475.
- [37] 邓述波, 余刚. 环境吸附材料及应用原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2012:1-4.  
DENG Shubo, YU Gang. *Environmental adsorbent and its application principle* [M]. Beijing: Science Press, 2012:1-4.
- [38] 沈叔云, 冯向东, 施国忠. 电吸附技术在火电厂循环冷却污水处理中的应用可行性研究 [J]. *浙江电力*, 2015, 34(11):89-99.  
SHEN Shuyun, FENG Xiangdong, SHI Guozhong. Feasibility study on application of electroadsorption technique in circulating cooling water treatment in thermal power plant [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2015, 34(11):89-99.
- [39] 关民普, 刘盟. 电除尘器的除尘原理、过程及优缺点 [J]. *科技信息*, 2011(25):99-101.  
GUAN Minpu, LIU Meng. Dust removal principle, process and advantages and disadvantages of electrostatic precipitator [J]. *Science and Technology Information*, 2011(25):99-101.
- [40] SUSS M E, BIESHEUVEL P M, BAUMANN T F, et al. In situ spatially and temporally resolved measurements of salt concentration between charging porous electrodes for desalination by capacitive deionization [J]. *Environmentalence & Technology*, 2014, 48(3):2008-2015.
- [41] JIA B, ZHANG W. Preparation and application of electrodes in capacitive deionization (CDI): A state-of-art review [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2016, 11(1):64-89.
- [42] 尹广军, 陈福明. 电容去离子研究进展 [J]. *水处理技术*, 2003, 29(2):63-66.  
YIN Guangjun, CHEN Fuming. Progress in capacitive deionization [J]. *Technology of Water Treatment*, 2003, 29(2):63-66.
- [43] 唐朝春, 许荣明. 电吸附水处理技术研究进展 [J]. *现代化工*, 2019, 39(10):15-23.  
TANG Chaochun, XU Rongming. Research progress in electroadsorption water treatment technology [J]. *Modern Chemical Industry*, 2019, 39(10):15-23.
- [44] NIGHTINGALE E R J. Phenomenological theory of ion solvation. effective radii of hydrated ions [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1958, 63(9):566-567.
- [45] MA S, MA L, CHEN G, et al. Experimental study on desalination

- using electro-sorption technology with plate-type activated carbon fiber electrode [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 126: 116-126.
- [46] 李永辉.电吸附技术在循环冷却排污系统排污水处理中的应用[J].*工业用水与废水*, 2012, 43(5): 71-73.  
LI Yonghui. Application of electrosorb technology in treatment of sewage discharged from circulating cooling water system [J]. *Industrial Water and Wastewater*, 2012, 43(5): 71-73.
- [47] 中华人民共和国生态环境部.关于发布《火电厂污染防治技术政策》的公告[EB/OL]. (2017-01-11). [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201701/t20170117\\_394809.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201701/t20170117_394809.htm).  
Ministry of Ecology and Environment, PRC. Announcement on the release of "pollution control technology policy of thermal power plant" [EB/OL]. (2017-01-11). [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201701/t20170117\\_394809.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201701/t20170117_394809.htm).
- [48] 叶春松, 罗珊, 张弦, 等. 燃煤电厂脱硫废水零排放处理工艺[J]. *热力发电*, 2016, 45(9): 105-108, 139.  
YE Chunsong, LUO Shan, ZHANG Xian, et al. Key problems and developing trend of zero discharge technology of desulfurization waste water [J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(9): 105-108, 139.
- [49] 叶春松, 黄建伟, 刘通, 等. 燃煤电厂烟气脱硫废水处理方法与技术进展[J]. *环境工程*, 2017(11): 15-18.  
YE Chunsong, HUANG Jianwei, LIU Tong, et al. Technology progresses and treatment methods of flue gas desulfurization wastewater in coal-fired plants [J]. *Environmental Engineering*, 2017(11): 15-18.
- [50] 施云芬, 王旭晖. 湿法烟气脱硫废水处理研究进展[J]. *工业水处理*, 2015, 35(12): 14-17, 43.  
SHI Yunfen, WANG Xuhui. Research progress in the wastewater treatment of wet flue gas desulfurization [J]. *Industrial Water Treatment*, 2015, 35(12): 14-17, 43.
- [51] 孙振宇, 沈明忠. 燃煤电厂脱硫废水零排放工程案例研究[J]. *工业水处理*, 2018, 38(10): 102-105.  
SUN Zhenyu, SHEN Mingzhong. Case study on zero discharge engineering of desulphurization wastewater in coal-fired power plants [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(10): 102-105.
- [52] 杜梦, 邵楠, 姜益善. 燃煤电厂水处理及脱硫废水零排放技术分析[J]. *山西建筑*, 2019, 45(4): 189-190.  
DU Meng, SHAO Nan, JIANG Yishan. Analysis on feasible technology about wastewater treatment and desulfurization wastewater zero discharge in thermal power plant [J]. *Shanxi Building*, 2019, 45(4): 189-190.
- [53] 崔丽. 火力发电厂脱硫废水深度处理工艺的应用[J]. *吉林电力*, 2018, 46(5): 145-146.  
CUI Li. Application of advanced desulfurization wastewater treatment technology in thermal power plants [J]. *Jilin Electric Power*, 2018, 46(5): 145-146.
- [54] 潘利祥, 孙国刚. 气液撞击流烟气脱硫零排放一体化技术[C]//中国环境科学学会2006年学术年会优秀论文集(下卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.  
PAN Lixiang, SUN Guogang. Integration of zero-emission technology for flue gas desulfurization with gas-liquid impingement flow [C]//Chinese Society for Environmental Science 2006 Annual Conference, Volume II. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [55] FARMER J C, FIX D V, MACK G V, et al. Capacitive deionization of NaCl and NaNO<sub>3</sub> solution with carbon aerogel electrode [J]. *Journal of Electrochemical Society*, 1996, 143(1): 159-169.
- [56] REN Q D, WANG G, WU T T, et al. Calcined MgAl-layered double hydroxide/graphene hybrids for capacitive deionization [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(18): 6417-6425.
- [57] MA X J, LI M, LIU X, et al. A graphene oxide nanosheet-modified Ti nanocomposite electrode with enhanced electrochemical property and stability for nitrate reduction [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 348: 171-179.
- [58] OREN Y. Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment: past, present and future (a review) [J]. *Desalination*, 2008, 228: 10-29.
- [59] CHRISTEN K. Desalination technology could clean up wastewater from coal-bed methane production [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(3): 639-647.
- [60] 陈兆林, 宋存义, 孙晓慰, 等. 电吸附除盐技术的研究及应用进展[J]. *工业水处理*. 2011, 31(4): 11-14.  
CHEN Zhaolin, SONG Cunyi, SUN Xiaowei, et al. Progress in the research on the electrosorption desalination technology and its application [J]. *Industrial Water Treatment*, 2011, 31(4): 11-14.
- [61] 陈静, 李玉道, 李小平. 曝气生物过滤—多介质过滤—电吸附工艺处理炼油污水[J]. *石化技术与应用*, 2008, 26(2): 184-188.  
CHEN Jing, LI Yudao, LI Xiaoping. Treatment of refinery wastewater by aerated biofiltration with multi-medium filtration and electric adsorption process [J]. *Petrochemical Technology and Application*, 2008, 26(2): 184-188.