

电吸附除盐技术在燃煤电厂中的应用研究进展

董旭明¹, 张胜寒^{1,2*}, 卢 权¹, 檀 玉^{1,2}

(1. 华北电力大学环境科学与工程系, 河北 保定 071003;

2. 河北省燃煤电站烟气多污染物协同控制重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:介绍了 4 种碳电极材料的优缺点;分析了国内外燃煤电厂的电吸附除盐技术应用案例,并结合电厂脱硫废水的特点指出了电吸附技术的发展方向以及存在的一些问题。实际应用结果表明,电吸附技术对水的前处理要求简单。处理能力达到 200 m³/h 及以上的工业化应用案例表明,电吸附除盐技术处理火力发电厂循环冷却水,在产水率为 70%~76% 的条件下,硬度、钙硬度以及氯化物的去除率可达 65%~80%,电吸附技术处理火力发电厂循环冷却水排水的除盐成本较低。

关键词:电吸附;燃煤电厂;电极材料

中图分类号:X703.01

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)02-0106-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.02.022

Research progress on application of electro-adsorption desalination technology in coal-fired power plant

DONG Xu-ming¹, ZHANG Sheng-han^{1,2*}, LU Quan¹, TAN Yu^{1,2}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University,

Baoding 071003, China; 2. Hebei Key Lab for Collaborative Control of Multi Pollutants in

Flue Gas of Coal Fired Power Station, Baoding 071003, China)

Abstract: The advantages and disadvantages of four kinds of carbon electrode materials are introduced. The application cases of electro-adsorption desalination technology in coal-fired power plants worldwide are analyzed. Combined with the characteristics of the desulfurization wastewater in power plant, the development direction and some problems of electro-adsorption desalination technology are proposed. Practical applications illustrate that electro-adsorption desalination technology requires simple pretreatment of wastewater. Two cases of industrial scale applications with a processing capacity of 200 cubic meters per hour or more show that the removal rates of hardness, calcium hardness and chlorides can reach 65%–80% when electro-adsorption desalination technology is applied to treat with the circulating cooling water drainage in coal-fired power plants and the water production rate is 70%–76%. The cost of desalination is low.

Key words: electro-adsorption; coal-fired power plant; electrode materials

随着工业的发展,水资源的缺乏成为限制人类生存发展的一大难题。发电行业是我国取用水量较大的行业之一,电力工业用水占到工业总用水量的一半^[1],因此如何解决电力系统用水的问题,实现电厂零排放技术是当今研究的热点。目前膜蒸馏、电渗析、反渗透等技术都存在着成本高、会造成膜污染,甚至产生二次污染等问题。

电吸附技术(EST)又称电容去离子技术(CDI),主要是利用水中污染物带电特性使其富集在不同的极板上,而达到净化水质的目的,具有运行可靠、能耗低、操作方便、产水率较高、综合运行成本较低等特点,特别是在化工、电力等高耗水行业有着很大的应用潜力。

1 电极材料

电极材料通常以碳材料为主,将碳粉与有机高分子材料混合,之后再加入导电剂混合。将各种材料混合,通过冷冻高温干燥煅烧等工艺来制作合适的电极材料。电极材料一般选择比表面积大、比电容高、导电性好的复合材料,现有单一的材料如活性炭、石墨烯等往往达不到理想效果,通常通过改性的方法提高材料性能。常用的吸附材料一般有以下几类:活性炭基电极^[2]、石墨烯基电极^[3]、碳气凝胶基电极^[4-5]、碳纳米基电极^[6]等。

(1) 活性炭基材料

活性炭(activated carbons, ACs)是使用最多的

收稿日期:2021-01-28;修回日期:2021-12-12

作者简介:董旭明(1995-),男,硕士生,研究方向为涂层老化程度的评估,962540029@qq.com;张胜寒(1962-),男,硕士,教授,博士生导师,研究方向为金属腐蚀与防护及废水处理,通讯联系人,zhang-shenghan@163.com。

多孔碳,具有比较面积大、孔隙率高等优点。其用途在 20 世纪六七十年代电容去离子技术研究中已得到证实。目前常常将活性炭与其他物质进行掺杂,以便更好地发挥优异的性能。Souad 等^[2]以枣石为原料在 900℃ 下成功制备了无黏合剂的微孔活性炭材料,经过表征和试验分析发现,这种材料具有较高的微孔率,比表面积达 896 m²/g,比电容为 270.90 F/g。之后对其进行 CDI 测试,测试结果表明,枣石制得的微孔活性炭电极是水处理中合适的 CDI 电极。研究表明,氮掺杂既可以提高材料的电导率和润湿性,也可以提供额外的伪电容,同时微孔结构可以增强电解质的渗透性能,并加速离子的转移。

(2) 石墨烯基材料

石墨烯是一种由碳原子以 sp² 杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的二维碳纳米材料,在 2005 年由 Geim 和其同事合成,并用作 CDI 材料的研究。石墨烯具有比表面积高、非凡的导电性等特点,是目前电极材料的研究热点之一。Zhu 等^[3]成功制备了多孔结构的氧化石墨烯电极,并用作电吸附试验,在 1.2 V 的电压下,吸附容量可达 14.4 mg/g,约为典型隔离孔的石墨烯电极(6.7 mg/g)的 2 倍,说明改善孔之间的开放互连性可以提高吸附容量。

(3) 碳气凝胶基材料

碳气凝胶的性能要优于活性炭,比表面积大、电导率高、孔隙结构分布可控,属于多孔材料,比表面积为 400~1 000 m²/g,可控的孔径分布小于 50 nm,是一种理想的电吸附材料。Kumar 等^[4]通过溶胶-凝胶工艺利用有机和二氧化硅前体制备了具有超高比表面积的含硅的炭气凝胶材料(比表面积 2 600 m²/g,比电容 262 F/g),用于电吸附试验。在 1.2 V、1 mol NaCl 的条件下,炭气凝胶电极的吸附容量可达 10.54 mg/g。在再生实验中,经过 10 个吸附/解吸循环,电极表面没有发生氧化,具有良好的再生性。这是由于二氧化硅前体会导致形成具有增加的孔隙率的 CA,从而使 CDI 的性能提高 80%。

Liu 等^[5]利用皮革废料作为原材料使用热解工艺制备了富含 N、O 和 S 掺杂的炭气凝胶电极(比电容 132.22 F/g)。在 1.2 V、500 mg/L NaCl 溶液中的电吸附容量可达 20.92 mg/g。材料中的变形碳纳米微晶(DCN)及其自身的异质掺杂可以提供不均匀的表面电荷分布,从而提高电极的电子和离子电导率以及水的可湿性。同时结构和掺杂缺陷也可以作为活性位点,提供了超高的比表面积(2 523 m²/g),从而提高电吸附容量。

(4) 碳纳米基材料

碳纳米管是 20 世纪 90 年代发明的一种新型碳材料,具有内腔结构,研究者往往通过改性处理使其比表面积和内腔表面积进一步增大来增加吸附容量。但是碳纳米材料的制作工艺复杂且价格昂贵,难以实现工业化。Zhu 等^[6]对细菌纤维素进行冷冻干燥和热处理,成功地制备了氮掺杂的碳纳米纤维气凝胶电极。在 1 000 mg/L NaCl 溶液中进行电吸附试验,吸附容量达 17.29 mg/g,远远高于未掺杂 N 的碳纳米纤维气凝胶电极(12.81 mg/g)。这是因为 N 的掺杂可以提高碳纳米纤维气凝胶的比表面积。

从上述吸附材料的研究进展中可以看出,虽然目前电吸附材料的研究很多,但是仍然存在许多需要改进的地方,如电极材料成本高、电流效率低、吸附剂再生周期长、电吸附系统的稳定性不高等,例如活性炭的孔径较小以及导电性能不够,限制了吸附的效果;石墨烯平面之间的强 π - π 相互作用和范德华力导致石墨烯极易团聚,进而使盐吸附能力仍未达到预期;碳气凝胶高昂的制作成本和复杂的制作工艺影响着工业化发展;碳纳米管复杂的工艺流程和粉末状态制约着发展。因此,优秀的电吸附材料一般具备以下特点^[7]:①较大的比表面积;②在正常工作时,具有良好的稳定性;③导电性好;④多孔电极和集电器之间的接触电阻低;⑤良好的湿润性;⑥低成本和可扩展性;⑦加工性能优异;⑧廉价易得。图 1 展示了 CDI 材料的发展历程。

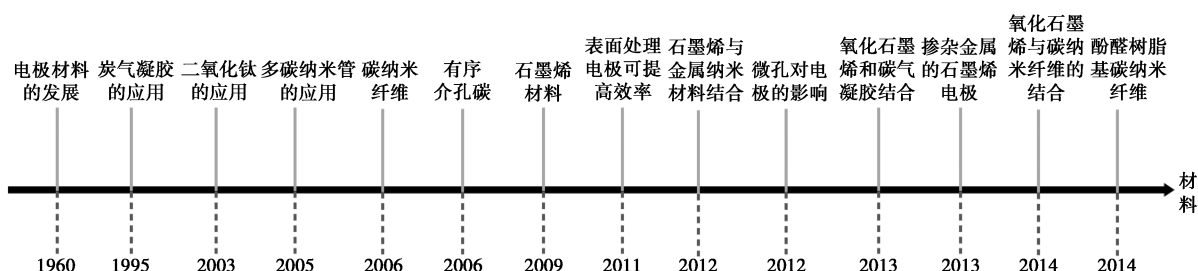


图 1 CDI 材料的发展历程

2 电吸附技术在燃煤电厂水处理中的应用

2.1 应用实例

近年来,电吸附技术的研究工作在国内发展迅速,其中某些技术已经开始运用于电厂。国内对电吸附技术的研究大多集中在电极材料的创新上,对于电吸附技术在电厂水处理工程方面的实例很少。使用万方数据库和中国知网对题名或关键字中同时含“电吸附”或“电容去离子”并且在摘要中包含“电厂”字的文献进行检索,文献类型包括期刊论文、会议论文和学位论文,共检索到 30 篇文献,其中只有 9 篇文献为有效文献,在这 9 篇文献中,期刊文献 4 篇,会议论文 3 篇,学位论文 1 篇以及综述论文 1 篇。国外对电吸附的工程案例几乎没有,在 Elsevier Science Direct 数据库中以“Capacitive Deionization”+“power plant”为关键词进行检索,共检索到 144 篇文献;以“electrosorption”+“power plant”为关键词进行检索,共检索到 70 篇文献;在 Google 上进行检索,可检索到 10 010 个网页,在这些检索结果中没有电吸附在电厂中应用的实例,仅有 1 例实验室规模(bench scale)的膜电吸附(MCDI)处理热电厂废水(电导率 2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Na^+ 1 020 mg/L , Cl^- 976 mg/L)的研究^[8],处理能力为 40 mL/min 。

张旭等^[9]采用电吸附技术处理沈阳联美新北热电厂反渗透 RO 浓水。实验结果表明,当系统为单程运行时,电吸附技术对 RO 浓水中各项指标的去除效果随水量的增加而降低,当水量为 2 m^3/h 时,去除效果达到最佳。当系统为循环运行时,电吸附技术对 RO 浓水的电导率、总硬度和钙硬度的去除效果随循环次数的增加而降低,且当循环 2 次时,对总硬度和钙硬度的去除效果均达到最佳。刘江等^[10]采用电吸附技术对国华准格尔发电有限责任公司的循环水排污水进行了深度除盐处理。试验过程中,为了防止系统发生结垢堵塞的现象,要进行加碱、沉淀、石英砂过滤等预处理,降低原水的浊度。试验结果表明,电吸附对总硬度、总碱度和平均电导率的去除效果能达到 70% 以上,对氯化物的去除效果可以达到 80%,产水均能满足回用要求。产水的运行成本为 1.5 $\text{元}/\text{m}^3$,按黄河水取水水价和排污费合计费用 4.6 $\text{元}/\text{m}^3$ 计算,年利润为 348 万元,5 年即可收回工程投资费用,经济效益显著。

朱广东等^[11]采用电吸附除盐设备,在宁波某热电厂有限公司建成了日处理量为 10 000 t 的项目,对

经混凝、沉淀过滤等预处理后的水进行深度处理,平均电导率的去除率为 69.4%,硬度的去除率为 66%,对氯化物的去除率最高,达到 79%,产水率在 75% 以上,运行费用 0.3 $\text{元}/\text{m}^3$,且运行稳定,维护简单,产水水质稳定,能够满足电力行业对除盐技术的要求,既有可观的经济效益,又有广泛的社会效益。沈淑云等^[12]采用 EMK600 电吸附模块对浙江浙能长兴发电有限公司 1 号机组循环冷却水系统排污水进行了电吸附试验。排污水经过砂滤后进入电吸附的工艺流程中进行深度处理。研究发现,电吸附技术的除盐效果好,对总硬度有 70% 以上的去除率,对氯离子有 65% 以上的去除率。同时能有效降低产水的 COD, COD 去除率达 62.3%,出水 COD 可以稳定在 2~11 mg/L 。处理成本约 0.5 $\text{元}/\text{t}$,电吸附设备有良好的耐受性,寿命长,运行操作简单,且无多余污染物产生。李永辉^[13]采用电吸附技术对循环冷却水系统排污水进行了电吸附试验。原水要经过预处理(通过提升泵至保安过滤器进行过滤)将大于 10 μm 的残留固体悬浮物或沉淀物截流,出水进入电吸附模块进一步净化。该技术对钙离子和氯离子的去除效果最好,能达到 85% 以上,电导率的平均去除率为 76.3%,总硬度平均去除率为 78.0%,除盐效果稳定,直接运行费用低,预处理要求简单,维护方便。经处理后的水能达到循环冷却水系统补水要求。黄忠源等^[14]以张家口城市再生水为研究对象,对石灰处理+电吸附组合工艺进行技术经济评估。研究表明,氯离子去除率约为 65%,产水率约 75%,除盐效果良好。电吸附系统的运行费用成本 1.05 $\text{元}/\text{t}$,采用石灰加电吸附组合工艺进行预处理后,电厂均化取水成本为 3.52 $\text{元}/\text{t}$,制水成本为 2.27 $\text{元}/\text{t}$,具有一定的经济优势。

表 1 对上述电吸附水处理技术在发电厂水处理中的应用案例进行了汇总。可见,在出水率 70%~76% 时, CDI 技术处理电厂循环冷却水排污水的处理成本较低。

目前,电吸附技术在我国发展较快,正处于发展的黄金时期。国内已有多家火电厂采用电吸附技术对电厂循环冷却水等进行除盐处理。与传统除盐技术相比,该技术不需要在除盐前加较多的预处理设施,对水质的适应性广,同时运行成本低,具有一定的经济优势,运行过程中,不添加任何的药剂,不会产生二次污染。目前, CDI 技术的研究热点是高吸附容量的电极材料。另一方面, CDI 技术在应用中

表 1 CDI 在电厂水处理中的应用

处理对象	RO 浓水 ^[9]	循环水 排污水 ^[10]	电厂混凝沉淀后的 出水 ^[11]	循环水 排污水 ^[12]	循环水 排污水 ^[13]	城市再生水 ^[14]
原水水质指标						
总硬度(以 CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	500	400~650	119	210~440	1062	—
钙硬度(以 CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	130	—	—	—	316	—
碱度(以 CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	300	300~500	—	—	≤300	—
氯离子/(mg·L ⁻¹)	105	340~560	—	70~216	229	—
电导率/(μs·cm ⁻¹)	1500	2800~3800	64.7	521~1474	2822	1728
COD	—	6~9(Mn)	389	14.9~33.0(Cr)	—	—
预处理工艺	—	加碱、沉淀、 石英砂过滤	混凝、 沉淀过滤	砂滤	过滤	石灰处理
预处理出水指标(浊度)/NTU	—	<5	—	—	—	—
处理能力/(m ³ ·h ⁻¹)	2	200	417	0.5	0.5	—
产水率/%	—	71.5	75	一段 82.4,二段 66.2	76.1	75
去除效果/(电导率指标:降低率, 其他水质指标:去除率)						
总硬度(以 CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	21	>70	66	>70	78	—
钙硬度(以 CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	18	—	—	—	78	—
碱度(以 CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	23	>70	—	—	—	—
氯离子/(mg·L ⁻¹)	33	>80	79	65	85	65
电导率/(μs·cm ⁻¹)	16	>70	69.4	67.4	76.3	—
COD	—	—	—	62.3	—	—
处理成本/(元·m ⁻³)	—	1.5(包含预处理)	0.3(不包含预处理)	0.5(不包含预处理)	—	2.27(包含预处理)

的主要问题是电极表面结垢和有机污垢降低了电极的除盐性能和寿命,影响水处理系统的长期稳定运行,需要进一步开展相关研究。

2.2 可行性分析

(1) 处理高 TDS 进水和去除效率

CDI 工艺主要适用于 TDS<4 000×10⁻⁶ 的废水,即地下水修复、微咸水淡化和工业废水的再生。电厂废水中的 TDS 浓度往往比 4 000×10⁻⁶ 高出几倍,高 TDS 浓度的废水会导致电吸附电荷效率下降。Zhao 等^[15] 发现当进料 TDS 浓度从 1 000×10⁻⁶ 到达 10 000×10⁻⁶ 以上时,经典 CDI 单元的充电效率会从 0.8 降低到 0.6,原因之一是在较高浓度的溶液下,排除的 Co 离子会降低电吸附设备的充电效率。而且 CDI 过程中能量损耗的另一个来源是电阻损耗,电阻损耗与电流几乎呈比例增加^[16],高 TDS 进水会导致电阻的损耗增加,进而需要更高的电流去维持 CDI 系统中盐的去除率和回收率,从而增加能耗。因此,当使用电吸附技术处理高 TDS 浓度的电厂废

水时,电吸附系统的固定总吸附量可能会导致单个吸附步骤中盐去除率不足,从而需要后续脱盐工艺进一步处理电吸附出水,从而增加成本。这并不适用于电厂经济高效的废水零排放系统,因为后续的脱盐工艺占废水零排放成本的主要部分^[17]。

(2) 有机结垢和无机结垢

与膜法处理废水的问题类似,电吸附过程中不可避免地会出现结垢等问题,只是由于过程中采用非压力驱动的方式,电吸附模块的结垢程度较小^[18]。通常电厂废水会采用三联箱工艺、纳滤、微滤和其他技术进行预处理,但是由于电厂废水复杂成分以及高浓度的特性,结垢现象仍然无法避免。在电吸附的过程中,废水中的无机和有机离子会向电极板迁移并累积。随着时间的延长,在饱和状态下,一些无机盐如钙/碳酸镁、石膏、氢氧化钙/镁和有机物就会沉积到吸附孔中,造成电吸附模块堵塞等现象。此外,电吸处的酸性条件可能会降低有机物的表面电荷,减少排斥力,从而促进有机物的聚

集^[19]。由于重金属离子存在解吸缓慢等问题,所以使用电吸附工艺处理废水时要严格控制重金属含量。高价态的重金属离子的解吸速度比 Na^+ 慢 20% 左右^[20]。它们可通过络合、螯合等作用形成价键,还可以与电极之间发生氧化还原反应,进而导致重金属在电极表面的不可逆吸附,最终造成电极中重金属的积累^[21-23]。此外,有研究表明,与单独的有机和无机污垢相比,无机和有机物之间的相互作用会加剧污垢的程度。例如, Ca^{2+} 之类的 2 价离子可以与自然有机物(NOM)中的羧基特异性相互作用,形成金属配合物^[24]。因此,电吸附模块结垢一直是电吸附工艺在电厂废水处理中实施的一大问题。

2.3 小结

电吸附技术是一种新型的水处理技术,具有许多的优势,在电厂水处理应用方面仍然处于萌芽阶段。与膜法减量浓缩技术相比,具有无需更换膜、成本低、不易结垢等优势;与烟气蒸发浓缩技术比,具有无需加药和无二次污染等优点。但是在电厂水处理应用方面仍有以下几点需要注意。

(1) 电吸附对进水的要求比较高,故要优化电厂脱硫废水的预处理,开发出高效低成本的预处理方法。预处理效果不好会导致进水污染物浓度过高,影响吸附效率,会造成电吸附进水堵塞等问题。

(2) 与膜法处理相比,电吸附结垢程度小,但仍然是一个无法避免的问题,尽管一些方法可以有效地减少结垢问题,如定期进行清理,对电极材料进行防污改性处理,但这都会大大增加相应成本,这在电厂水处理中是不可行的。因此如何能够廉价地解决电吸附的结垢问题是今后电吸附技术在电厂水处理应用的研究重点。

(3) 重视电吸附技术与其他技术的集成。如电吸附技术与膜分离技术的结合,可以有效延长膜系统的使用寿命;电吸附技术与太阳能技术结合,可以有效地节约成本。它们的结合可以充分地发挥彼此的优势。

(4) 重视电吸附技术的耦合作用。例如,电吸附技术可以与催化剂进行耦合,在电极材料中加入催化剂,加强电极对水中污染物的吸附作用;电吸附技术与选择性透过膜进行耦合,实现电吸附技术的选择性吸附,这对于电厂中脱硫废水高钙镁离子的去除提供了新的应用可能性。

总之, CDI 技术在实验室研究方面已经发展出了很多不同的类型,如 MCDI、流动电极 CDI 等。

CDI 技术在处理成本上的优势使其有望成为下一代除盐技术,在电厂水处理方面拥有着广阔的发展前景。

3 结语

(1) 与传统技术相比,电吸附技术具有高适应性、环保和低运行成本的明显优势,在电厂应用研究中有着很广阔的前景。但是如何选择合适的低成本预处理工艺,使其达到电吸附的进水要求也是一大重点。此外,如何选择合适的电压、电极间距,尽量防止电极结垢现象,提高运行稳定性也是电吸附过程中的一个难点。因此,应注重探究高吸附容量、高吸附速率、低成本的电极材料;改进电吸附装置的通道结构;加强电极材料吸附后再生性能的研究。

(2) 国外几乎没有电吸附水处理技术在发电厂应用的案例。国内目前电厂有电吸附的应用实例,多数处于中试规模水平,其中 2 例处理能力达到 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 及以上的工业化规模。应用结果表明,电吸附除盐技术处理火力发电厂循环冷却水,在产水率为 70%~76% 的条件下,硬度、钙硬度以及氯化物的去除率可达 65%~80%,电吸附技术处理火力发电厂循环冷却排污水的 CDI 运行成本以及综合除盐成本均较低。

参考文献

- [1] 李霞.工业节水的对策与措施浅谈[J].新疆钢铁,2006,(2): 48-50.
- [2] Souad R, Ibtissem B A, Yosra L, *et al.* Microporous activated carbon electrode derived from date stone without use of binder for capacitive deionization application[J]. Materials Research Bulletin, 2019, 111: 222-229.
- [3] Zhu Yueshuai, Zhang Gujia, Xu Chao, *et al.* Interconnected graphene hollow shells for high-performance capacitive deionization [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(26): 29706-29716.
- [4] Rudra Kumar, Soujit Sen Gupta, Shishir Katiyar, *et al.* Carbon aerogels through organo-inorganic co-assembly and their application in water desalination by capacitive deionization[J]. Carbon, 2016, 99: 375-383.
- [5] Liu Yihan, Zhang Xiongfei, Gu Xiao, *et al.* One-step turning leather wastes into heteroatom doped carbon aerogel for performance enhanced capacitive deionization [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2020, 303: 110303.
- [6] Zhu Guang, Hongyan Wang, Haifeng Xu, *et al.* Enhanced capacitive deionization by nitrogen-doped porous carbon nanofiber aerogel de-

- rived from bacterial-cellulose [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, 822: 81–88.
- [7] Oren Y. Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment—past, present and future (a review) [J]. *Desalination*, 2008, 228(1/2/3): 10–29.
- [8] Lee J B, Park K K, Eum H M, *et al.* Desalination of a thermal power plant wastewater by membrane capacitive deionization [J]. *Desalination*, 2006, 196(1): 125–134.
- [9] 张旭, 提芸, 赵波. 电吸附技术处理电厂反渗透浓水试验研究 [J]. *给水排水*, 2013, 49(S1): 366–368.
- [10] 刘江, 谢凤龙, 张鹏. 电吸附技术在电厂废水处理中的试验研究 [J]. *工业水处理*, 2015, 35(4): 68–71.
- [11] 朱广东, 郭洪飞, 孙晓慰, 等. 电吸附技术在电厂水处理系统中的应用 [C]//中国脱盐协会: 2010 中国电力脱盐技术论坛论文集, 2010: 117–121.
- [12] 沈叔云, 冯向东, 施国忠. 电吸附技术在火电厂循环冷却水处理中的应用可行性研究 [J]. *浙江电力*, 2015, 34(11): 89–91, 99.
- [13] 李永辉. 电吸附技术在循环冷却水系统排污水处理中的应用 [J]. *工业用水与废水*, 2012, 43(5): 71–73.
- [14] 黄忠源, 李进, 祁誉, 等. 再生水作为发电厂水源的预处理技术经济性评估 [J]. *华北电力技术*, 2016, (12): 38–42.
- [15] Zhao R, Biesheuvel P, Van der Wal, *et al.* Energy consumption and constant current operation in membrane capacitive deionization [J]. *Energy Environ Sci*, 2012, 5(11): 9520–9527.
- [16] Hemmatifar A, Palko J W, Stadermann M, *et al.* Energy breakdown in capacitive deionization [J]. *Water Res*, 104: 303–311.
- [17] Tong T, Elimelech M. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: Drivers, technologies, and future directions [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(13): 6846–6855.
- [18] Choi J, Dorji P, Shon H K, *et al.* Applications of capacitive deionization: Desalination, softening, selective removal, and energy efficiency [J]. *Desalination*, 2019, 449: 118–130.
- [19] Jiang S, Li Y, Ladewig B P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 595: 567–583.
- [20] Lado J J, Perez-Roa R E, Wouters J J, *et al.* Evaluation of operational parameters for a capacitive deionization reactor employing asymmetric electrodes [J]. *Separ Purif Technol*, 2014, 133: 236–245.
- [21] Kołodynska D, Krukowska J, Thomas P. Comparison of sorption and desorption studies of heavy metal ions from biochar and commercial active carbon [J]. *Chem Eng J*, 2017, 307: 353–363.
- [22] Inyang M I, Gao B, Yao Y, *et al.* A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal [J]. *Crit Rev Environ Sci Technol*, 2016, 46(4): 406–433.
- [23] Xu J, Cao Z, Zhang Y, *et al.* A review of functionalized carbon nanotubes and graphene for heavy metal adsorption from water: preparation, application, and mechanism [J]. *Chemosphere*, 2018, 195: 351–364.
- [24] Wang J, Wang L, Miao R, *et al.* Enhanced gypsum scaling by organic fouling layer on nanofiltration membrane: Characteristics and mechanisms [J]. *Water Res*, 2016, 91: 203–213. ■

.....

(上接第 105 页)

- [12] Jing W, Huiqing L, Genbao Q, *et al.* Investigations on spontaneous imbibition and the influencing factors in tight oil reservoirs [J]. *Fuel*, 2019, 236: 755–768.
- [13] 范华波, 薛小佳, 李楷, 等. 驱油型表面活性剂压裂液的研发与应用 [J]. *石油与天然气化工*, 2019, 48(1): 74–79.
- [14] 张志升. 适用于致密砂岩储层的多功能表面活性剂驱油压裂液体系 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(1): 169–174.
- [15] 李婷, 李新发, 杨震, 等. 具有渗吸驱油效果的压裂液体系室内研究 [J]. *石化技术*, 2018, 25(8): 307–308.
- [16] 张学鹏. 压裂用渗吸表面活性剂的制备与应用 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2019.
- [17] 肖程释. 复合压裂液体系提高致密油藏渗吸采收率实验研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- [18] 李斌. 交联酸化压裂在低渗透气田的应用 [J]. *石油化工应用*, 2010, 29(11): 15–19.
- [19] 车明光, 王永辉, 袁学芳, 等. 交联酸化压裂技术的研究和应用 [J]. *石油与天然气化工*, 2014, 43(4): 413–415.
- [20] 李婷, 丁观世, 曹耐. 一种新型酸化清洁压裂液的研究与应用 [J]. *钻采工艺*, 2016, 39(3): 103–105.
- [21] 刘合, 张劲, 张士诚. 多功能清洁酸性压裂液的设计 [J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 427–429.
- [22] 赵立强, 杜娟, 刘平礼, 等. 一种高性能有机酯前置酸加砂压裂隔离液体系 [J]. *天然气工业*, 2012, 32(6): 43–45.
- [23] Thomas L, Tang H, Kalyon D M, *et al.* Toward better hydraulic fracturing fluids and their application in energy production: A review of sustainable technologies and reduction of potential environmental impacts [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 173: 793–803.
- [24] 孙建新, 浦三龙, 魏江伟, 等. 姬塬油田压裂返排液配制调剖剂的探索研究 [J]. *石油化工应用*, 2016, 35(10): 50–54.
- [25] 王所良, 王玉功, 李志航. 稠化水清洁压裂液返排液驱油技术 [J]. *油田化学*, 2016, 33(4): 623–628.
- [26] 周文胜, 王凯, 刘晨, 等. 清洁压裂液返排液再利用驱油体系研究 [J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(2): 160–166.
- [27] 王欢, 由庆, 韩坤, 等. 清洁压裂液返排液复配驱油体系的构建及性能评价 [J]. *油田化学*, 2018, 35(2): 302–307.
- [28] 秦文龙, 黄甫丽盼, 乐雷, 等. 黏弹性表面活性剂压裂返排液的界面性能及驱油效果评价 [J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2016, 31(3): 81–85.
- [29] 吴新民, 陈亚楠. 一种高性能清洁压裂液返排液驱油的可行性实验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(32): 245–250.
- [30] 吕乃欣, 刘开平, 高燕. 驱油型可回收清洁压裂液的研制与应用 [J]. *油田化学*, 2018, 35(3): 395–400. ■