

专论与综述

电吸附水处理技术及设备

孙晓慰,朱国富

(常州爱思特净化设备有限公司,江苏常州 213022)

[摘要] 主要介绍电吸附水处理技术(EST)与系统及其应用试验情况,实验表明,电吸附技术可用于水的除盐淡化及去硬,具有能耗低、使用简便以及对环境友好等特点。并依据已经掌握的技术数据,提出了其应用领域及市场前景的展望。

[关键词] 电吸附水处理技术;EST模块;吸附等温等电势线;电吸附性能

[中图分类号] TQ085 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2002)08-0001-03

Electro-adsorption technology and EST equipment

SUN Xiao-wei, ZHU Guo-fu

(EST Purification Equipment Co., Ltd., Changzhou 213022, China)

Abstract: The effectiveness of water demineralization with electro-adsorption technology has been studied. Test results show that the electro-adsorption technology and EST systems can be used for the purpose of removing various ions from water. The process has very low energy consumption and is environment-friendly. The pilot tests demonstrates that the technology has a bright future in the area of water desalination and/or demineralization.

Key words: electro-adsorption technology; EST module; adsorption isopotential isotherm; electro-adsorption capacity

电吸附水处理技术(EST)及EST模块不久前问诸于世,它具有运行成本十分低廉、应用范围广、操作方便、可靠、几乎无须检修以及不产生任何导致环境污染的二次排放物等特点。以EST模块为核心组装而成的处理系统可用于水的除盐、去硬、淡化及饮用水深度处理、电镀废水处理等等。与现有水处理技术相比,EST展示出一系列优越性和在大多数工艺过程中发挥作用的可行性。笔者根据在EST技术研究开发及实际应用过程中所得的结果,着重介绍EST技术的基本工作原理及实验数据。

1 电吸附技术原理

EST技术利用带电电极表面吸附水中离子/带电粒子的现象,使水中溶解盐类及其他带电物质在电极表面富集浓缩而实现水的净化/淡化。原水从一端进入由阴、阳电极形成的通道,最终从另一端流出。原水在阴阳电极之间流动时受到电场作用,水中离子/带电粒子将分别向带相反电荷的电极迁移,被该电极吸附,储存在电极表面所形成的双电层中。随着离子/带电粒子在电极表面富集浓缩,使通道水中的溶解盐类、胶体颗粒及其他带电物质的浓度大大降低,从而实现了水的除盐、去硬、淡化及净化。

根据双电层理论,电极表面的离子吸附量与体相浓度及表面电位之间有如下的关系:

$$q = \frac{(8RT)^{1/2} (C)^{1/n} \sinh\left(\frac{zF}{2RT}\right)}{zF}$$

令 $k = \frac{(8RT)^{1/2} \sinh\left(\frac{zF}{2RT}\right)}{zF}$, 则 $q = k(C)^{1/n}$

式中, q 为表面电荷数;为水在电极表面的介电常数; C 为水中离子浓度; z 为离子电价数; F 为法拉第常数;为电极表面电位; R 为通用气体常数; T 为热力学温度; n 为一实验所得常数。

从上式可看出,当电极表面电位达到一定值时,双电层离子浓度可达溶液体相浓度的成百上千倍。

当含有一定量盐类的原水经过由高性能电极材料组成的EST模块时,离子在直流电场的作用下被储存在电极表面的双电层中,直至电极达到饱和。此时,将直流电源去掉,并将正负电极短接,由于直流电场的消失,储存在双电层中的离子又重新回到通道中,随水流排出,电极也由此得到再生。

EST模块处理效果的好坏主要取决于电极的吸附性能。通常,对材料吸附能力的描述是通过获

得吸附等温等线来进行的,而对电吸附来说,除了要考虑温度的影响外,还必须考虑到另一个自由度,即电极电势的影响。因此,该技术的研究是通过测定等温等电势线了解掌握电极材料的电吸附性能着手的。

图 1 示出电极材料对氯化钠的等电势吸附等温线。实验条件:温度 25 ,电极电压 1 V。通过对曲线的回归计算,得出吸附量与平衡质量浓度的关系。如下式所示,吸附量与平衡浓度呈平方根关系,符合理论预测。

$$m_{ad} = 0.6 \cdot C^{0.50}$$

式中, m_{ad} 为电极吸附量, mg/g; C 为氯化钠溶液的平衡质量浓度, mg/L。

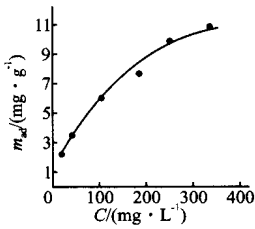


图 1 氯化钠在电极材料上的等电势吸附等温线

2 EST 模块

用高效功能性电极材料,依据水力学、电化学、机械学、电子控制学理论设计加工成电吸附水处理设备的组合单元件——EST 模块,这是使这一技术走向产业化的关键。模块可由边框、阴阳电极接头、高效能材料阴极板和阳极板、隔离密封垫、压紧螺栓螺母、支承架等组成,阴、阳电极板和隔离密封垫之间形成水流通道,同时设置了进水管路(见图 2)。

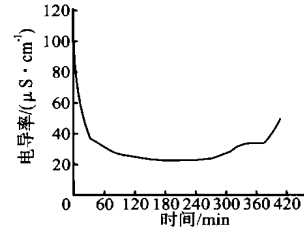


图 2 EST 模块

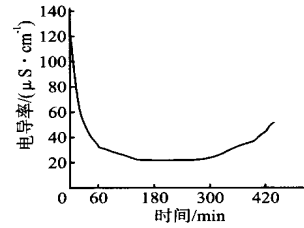
边框和支承架是固定电极板和承受水流压力、自重的零件,必须是绝缘性好、有较高机械强度的材料。进水管路及阀门在设置时也应充分顾及水流畅通及控制调节方便等因素。

2.1 小型 EST 模块的实验结果

以 500 mg/L NaCl 溶液为原水,在流量 30 L/h,电压 2 V 的情况下,采用小型 EST 模块试验所得出水的电导率曲线见图 3、图 4。



去除率为 93.5%,流量为 30 L/h,处理总量为 180 L
图 3 500 mg/L NaCl 水溶液的试验曲线



去除率为 92.7%,流量为 30 L/h,处理总量为 205 L
图 4 500 mg/L NaCl 水溶液的试验曲线
(50 工作周期后)

大量实验证明,对于某一组 EST 模块来说,在一定温度、电压和原水水质状况下,其吸附量是一个比较稳定的常数,原水流速的高低只影响其运行的除盐率和出水水质。

2.2 不同流量下的除盐效果

对于一定的电极材料与模块结构,模块的除盐效果与水流量有关。通常在大流量的情况下,除盐处理的深度比小流量时小,这和水在模块中的驻留时间有一定的联系。试验模块在四种不同流量下对自来水脱盐的实验结果见图 5。实验条件:总含盐量 250 mg/L,模块电压 1.7 V。从图 5 可以看出,随着流量的减少,除盐的效果越来越好,说明在一定条件下,传质过程控制着除盐的效果。对于要求不高的应用场合,可以采用大流量的运行方式;而对除盐深度要求高的场合,则应采用小流量的运行方式。然而,无论流量大小,模块的总吸附量是不变的,它取决于电极材料的性能。为了提高效率,改善模块的传质过程将是一个重要的课题。

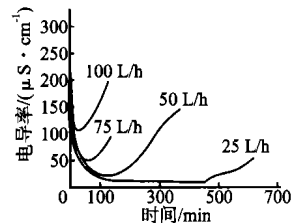


图 5 不同流量下的除盐实验结果

2.3 不同含盐量时的除盐效果

从上述可知,电极吸附能力与原水浓度有关,浓

度越高,吸附量也越大。但是,由于吸附量与浓度的平方根成正比,吸附量的增加在高浓度时变得很小,所以,电极的吸附量在浓度达到一定值时开始接近一个常量,而电吸附的优势也在原水含盐量很高时逐渐消失。EST 模块在不同原水浓度下的除盐实验结果见图 6。实验条件:流量 50 L/h,电压 2 V。

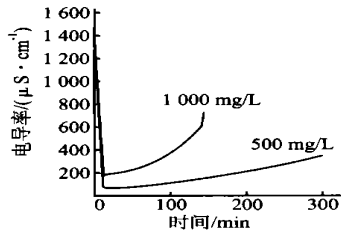


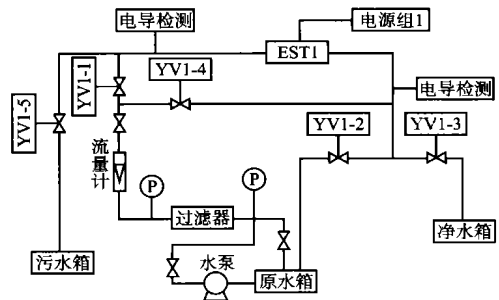
图 6 不同原水含盐量时的除盐实验结果

3 EST 系统及运行

EST 系统由原水箱、水泵、前置过滤器、EST 模块、后置过滤器、成品水箱、管阀系统、电源系统、检测仪表及电气控制系统等组成。由于 EST 模块的水流阻力很小,所需压力不到 0.3 MPa,因此对泵的要求不高,普通的离心泵即可满足使用要求。同时,EST 模块对原水中余氯、有机物、高价离子的浓度没有特别限制,所以对预处理的要求主要在于泥沙、悬浮物的过滤去除,通常可采用 PP 滤材过滤、沙滤等手段。如对成品水有较高要求,可以在 EST 模块后加精密过滤器、UV 杀菌器或臭氧杀菌器以及其他后置处理装置。模块的供电通过一大功率直流电源来实现,因模块是工作在恒电压状态下,直流电源必须能够提供一稳定的直流电压,一般在 2 V 以下。如前所述,EST 模块的工作是间隙式的,在电极饱和后,需要对其进行再生,电气控制系统将负责电源、水路的通断、切换。

由于系统采用模块化结构,针对各特定的应用场合可根据需要将模块作任意组合以实现处理目标。在需要大流量时,可将模块并联,而在需要大的处理深度时,可将模块串联。图 7 示出一典型 EST 系统的流程,运行时,进出水阀门开启,直流电源接通,即可以生产电导率大大低于原水的除盐水。试验表明,当进水含盐量在 1 000 mg/L 以下时,经 EST 模块处理后,出水电导率可低于 30 ~ 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。随着运行时间的延长,一般在 5 ~ 6 h 后,电极表面吸附趋于饱和,此时出水电导率将升高,系统进入再生状态。再生时,出水阀门关闭,排污阀开启,同时直流电源断开,EST 模块阴阳两极短接,工作过程中富集在电极表面的离子从电极表面解吸下来,随水流经过排污阀冲走,再生排水的电导瞬时高

峰值是原水电导值的 5 ~ 10 倍,甚至更高。再生时间一般为运行时间的 1/2 ~ 1/6,因为离子需要有一个扩散穿越电极材料的过程。当再生排水电导与原水电导相当时,则可认为再生结束,系统进入第二个运行周期。



P - 压力表; YV - 电磁阀; EST - 电吸附水处理模块

图 7 EST 系统流程

4 电吸附水处理技术的特性

(1) 运行能耗低、水利用率高、经济性好。EST 技术的能耗很低,其主要的能量消耗在于使离子发生迁移,而在电极上并没有明显的化学反应发生。如有必要还可以将所用的能量回收一部分过来,即将吸附饱和的模块上储存的电能再加入到另一再生好的模块上,也即所谓的“秋千式”供电方式。与其他除盐技术相比可以大大地节约能源。一个实验模块以 50 L/h 流量,75% 除盐率处理 TDS 为 1 000 mg/L 的原水时,能耗仅约为 60 W。其根本原因在于 EST 技术净化/淡化水的原理是有区别地将水中离子提取分离出来,而不是把分子从待处理的原水中分离出来。

另外一方面,EST 技术可以大大提高水的利用率,一般情况下,水的利用率可以达到 75% 以上,如采用适当的工艺组合,甚至可达 90% 以上。

更重要的一点是 EST 技术不需要任何化学药剂来进行水的处理,从而避免了二次污染问题。EST 系统所排放的浓水系来自原水,系统本身不产生新的排放物。与离子交换技术相比,省去了浓酸、浓碱的运输、贮存带来的操作上的麻烦,而且不向外界排放酸碱中和液。

(2) 操作及维护简便、设备寿命长。由于 EST 系统不采用膜类元件,因此对原水预处理的要求不高,而且即使在预处理上出一些问题也不会对系统造成不可修复的损坏。铁、锰、余氯、有机物、钙、镁、

(下转第 40 页)

表4 地表水中 Hg 在不同保存剂中的稳定性统计检验结果

保存剂		A	B	C	D
$\bar{X}_{0.5}$ 与 \bar{X}_{1d}	t 值	5.19	0.58	2.59	0.71
	显著水平	显著	不显著	不显著	不显著
$\bar{X}_{0.5}$ 与 \bar{X}_{7d}	t 值	5.23	1.23	2.53	1.58
	显著水平	显著	不显著	不显著	不显著
$\bar{X}_{0.5}$ 与 $\bar{X}_{1个月}$	t 值	6.52	0.58	4.44	1.76
	显著水平	显著	不显著	显著	不显著
$\bar{X}_{0.5}$ 与 $\bar{X}_{6个月}$	t 值	7.43	1.61	5.13	1.84
	显著水平	显著	不显著	显著	不显著

由于污染湘江霞湾段水体的 Hg 主要来自附近的一家化工厂,所以,本次试验废水样品采自该化工厂不同的外排口。共采 3 个样品,分别编号 Y₁、Y₂ 和 Y₃,其分析结果见表 5。

表5 废水中 Hg 在不同保存剂中的稳定性试验结果

样品编号	保存剂	0.5 h	1 d	7 d	1 个月	6 个月
Y ₁	A	59.6	46.3	40.8	36.9	34.5
	B	61.2	59.9	58.5	57.7	58.0
	C	59.2	53.8	45.5	41.5	39.8
	D	60.3	59.5	58.1	55.3	53.6
Y ₂	A	65.3	50.6	45.6	40.3	37.5
	B	64.8	65.0	63.5	62.2	60.9
	C	66.1	59.3	51.6	48.0	46.5
	D	65.9	64.5	63.3	62.9	62.0
Y ₃	A	71.0	58.3	50.2	46.5	43.3
	B	71.8	70.5	69.2	67.8	66.4
	C	69.5	64.9	56.1	51.3	49.8
	D	70.6	71.5	70.2	66.3	64.6

为便于更直观的了解废水中 Hg 在不同保存剂中的稳定性差异,也将不同时间的测定结果(\bar{X}_i)与 0.5 h 的测定结果($\bar{X}_{0.5}$)进行统计检验,其检验结果见表 6。

从表 5 和表 6 可知,虽然废水中 Hg 在各种保存剂中的稳定性与 Hg 质控标和地表水一致,但废

(上接第 3 页)

pH 值等对系统几乎没有什么影响。在停机期间也无需对核心部件做特别保养。系统采用计算机控制,自动化程度高,对操作者的技术要求较低。从理论上讲,EST 模块可以长期服役,预期寿命至少在 15 a 以上。

(3)应用范围广。EST 技术及系统不仅可以被应用在饮用水的处理上,还可以在电子电力、化工制药、轻纺造纸等工业的工艺用水及锅炉补给水处理

表6 废水中 Hg 在不同保存剂中的稳定性统计检验结果

保存剂		A	B	C	D
$\bar{X}_{0.5}$ 与 \bar{X}_{1d}	t 值	2.24	0.15	1.01	0.07
	显著水平	不显著	不显著	不显著	不显著
$\bar{X}_{0.5}$ 与 \bar{X}_{7d}	t 值	4.21	0.41	2.50	0.28
	显著水平	不显著	不显著	不显著	不显著
$\bar{X}_{0.5}$ 与 $\bar{X}_{1个月}$	t 值	4.95	0.65	3.61	0.80
	显著水平	显著	不显著	不显著	不显著
$\bar{X}_{0.5}$ 与 $\bar{X}_{6个月}$	t 值	5.79	0.96	4.44	0.96
	显著水平	显著	不显著	显著	不显著

水中 Hg 要稳定得多,这是由于 Hg 浓度高,还原损失的相对量较小的缘故^[2]。

3 结论

3.1 Hg 质控标稀释液的选择

经试验,Hg 质控标采用 5% (质量分数) HNO₃ - 0.05% (质量分数) K₂Cr₂O₇ 溶液稀释最为稳定,半年后 Hg 浓度仍在保证值范围内。

3.2 地表水和废水的保存方法

根据分析需要,确定大概的采样量。采样前,在实验室内将保存剂 HNO₃ 和 K₂Cr₂O₇ 加入洁净的采样壶中,加入量为每升水样 50 mL HNO₃ 和 0.5 g K₂Cr₂O₇,在 4℃ 下可保存半年不变。

[参考文献]

[1]王建龙,文湘华.现代环境生物技术[M].北京:清华大学出版社,2001:315.
 [2]水和废水监测分析方法指南编委会.水和废水监测分析方法指南[M].北京:中国环境科学出版社,1990:81—84.
 [3]中国环境监测总站.环境水质监测质量保证手册[M].北京:化学工业出版社,1994:264—265.

[作者简介] 刘芬(1959—),1983年毕业于西南农学院(现西南农业大学)土化系,高级实验师。电话:0732-8290650。

[收稿日期] 2002-01-08

以及环保废水、污水处理等领域得到应用。苦咸水淡化及至海水淡化将是 EST 技术的一个更加诱人的应用领域。

[作者简介] 孙晓慰(1963—),1998年毕业于美国密执安理工大学冶金与材料工程系,获博士学位,现任常州爱思特净化设备有限公司董事长兼总经理,常州市水处理协会会长。联系电话:0519-5119827。

[收稿日期] 2002-01-14