

# 电絮凝在西北地区窖水浊度去除中的参数优化研究

张国珍<sup>1</sup>, 巩师俞<sup>1</sup>, 武福平<sup>1</sup>, 杨仕超<sup>1</sup>, 刘玲花<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038)

**摘要:**以模拟集雨窖水为实验原水,通过改变电絮凝过程中的电流密度、通电时间、极板间距等因素值的大小,研究电絮凝在原水浊度去除中的最优参数组合。得出影响浊度去除效果的各因素主次关系依次是:电流密度 > 极板间距 > 反应时间,当电流密度为 18.89 A/m<sup>2</sup>,极板间距为 1 cm,反应时间为 13 min 时为电絮凝去除浊度的最优组合,浊度去除率为 92.94%,同时对窖水中的 COD<sub>Mn</sub>、UV<sub>254</sub>也有一定的去除效果。

**关键词:**电絮凝;集雨窖水;电流密度;浊度去除率

中图分类号:X703.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2012)01-0038-04

## Study on optimum parameter for turbidity removal in rainwater collection by electro-coagulation in northwest region

ZHANG Guozhen<sup>1</sup>, GONG Shiyu<sup>1</sup>, WU Fuping<sup>1</sup>, YANG Shichao<sup>1</sup>, LIU Linghua<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Department of Water Environment, IWHR, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The collecting rain water was used as raw water in this experiment. The current density, electrified time, polar board spacing were changed in electro-coagulation process to search the optimum parameter for removal of raw water turbidity. The sequence relation of each factor one by one which affect the removal effect is current density > polar board spacing > contact time. When the current density was 18.89 A/m<sup>2</sup>, polar board space was 1 cm, contact time was 13 mins, which is the optimum combination in electro-coagulation process of turbidity removal. Removal rate of COD<sub>Mn</sub> and UV<sub>254</sub> was improved in rainwater collection while the removal rate of turbidity was 92.94%.

**Key words:** electro-coagulation; rainwater collection; current density; removal rate of turbidity

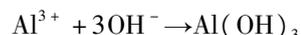
## 0 引言

我国西北黄土塬地区缺少可利用的地表水及地下水资源,当地人畜用水严重短缺,制约了经济的发展和人民生活水平的提高。为解决这一问题,从20世纪80年代我国西北地区开始实施“121”、“母亲水窖”等雨水集流工程,这些措施大大缓解了西北缺水地区的用水危机问题,然而,与此相关的水质问题也随之产生,这些地区受到经济因素的制约、居民生活习惯的影响、农村禽畜养殖和农药化肥大量施用,造成该地区水质卫生状况差,虽然部分学者进行关于集雨水利用及相关水质方面的研究,尤其针对西北缺水地区窖水水质监测方面做了大量的研究工作<sup>[1-2]</sup>。但是污染物造成的水质不达标的问题一直

没有得到有效解决。为改善这一状况,本实验采用电絮凝技术对甘肃地区集雨饮用水浊度的去除效果进行探讨,找到合适的实验参数,为进一步的研究提供理论支撑。

国外已将电絮凝方法应用于给水及多种废水的处理包括地下水处理领域<sup>[3-6]</sup>。电絮凝与传统的絮凝相比,不需要投加絮凝剂,从而给运行带来极大地方便;设备构造简单而且使用灵活,适合在农村、小型居民点使用,电絮凝过程中以铝板作为电极时,作其作用机理主要有以下两个方面所影响:

其一,在通电过程中,阳极极板会发生Al电解生成Al<sup>3+</sup>的氧化反应:



收稿日期:2011-09-14

基金项目:长江学者和创新团队发展计划(IRT0966)资助项目;国家支撑计划(2006BAJ08B08-03);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07425-005);甘肃省建设厅科技计划项目(JK2007-21)资助

作者简介:张国珍(1969-),男,甘肃靖远人,硕士生导师,教授,从事环境管理与规划、水污染治理方面的研究工作。

阴极反应: $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$  当  $\text{Al}^{3+}$  浓度较高或者随着水解时间的延长发生陈化时,可形成多核配位化合物和  $\text{Al}(\text{OH})_3$  沉淀,反应如下:

$\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_n^{3-n} \rightarrow \text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+} \rightarrow \text{Al}_{13}$  聚合物  $\rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3$ 。在  $\text{pH} = 4 \sim 9$  的范围内,电化学所产生的  $\text{Al}^{3+}$  及其聚合产物包括  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 、 $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$  和多核配位化合物  $[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+}]$  等<sup>[7]</sup>,这些电解出的金属离子和水解聚合物具有压缩双电层、吸附电性中和和卷扫网捕作用,从而促进絮体的形成,对浊度有着较高的去除效果;其二在极板电场诱导的作用下,水中粒子内部的电荷会重新分布,在靠近极板正极一侧粒子的半个表面会带负电荷,而粒子的另外半个表面由于靠近极板负极而带正电荷,从而产生了粒子偶极化效应<sup>[7]</sup>。由于异性电荷相互吸引的作用,许多偶极化粒子便会碰撞聚合在一起形成大的粒子,加速了水中絮体的形成,而前者是电絮凝过程中絮体产生的主要原因。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 实验装置

本试验是在自制的电絮凝反应器中进行,该电絮凝反应器的内部有效尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 95 \text{ mm}$ ,以铝板作为阴阳极材料,铝板的尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,电絮凝反应器内插入多块极板,极板间距可随要求进行调节,电极的连接方式采用复极式连接。极板浸水深度为  $90 \text{ mm}$ 。装置如图 1。

### 1.2 实验原水水质

实验用水采用模拟集雨窖水。经雨期收集的雨水在水窖中长期沉降后取水,实验季节为 6 月上旬,水温为  $18 \sim 19^\circ\text{C}$ ,低浊稳定,传统的石英砂过滤后浊度仍难以达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)的要求。原水水质参数见表 1。

表 1 原水水质参数 NTU,  $\text{mg/L}$ ,  $\text{cm}^{-1}$

指标	浊度	$\text{COD}_{\text{Mn}}$	$\text{UV}_{254}$	$\text{pH}$
数值	11.2 ~ 9.15	5.40 ~ 4.0	0.064 ~ 0.043	8.04 ~ 8.28

### 1.3 实验方法

本实验主要考察在静态条件下,电絮凝对窖水浊度的去除效果,利用先正交后单因素分析的实验方法,通过控制不同的电流密度、极板间距、反应时间等因素大小来研究电絮凝对集雨窖水的浊度去除效果。其中极板的有效接触面积为  $0.009 \text{ m}^2$ ,电

流、电压(平均值)与电流密度的对应值见表 2。

表 2 试验中电压、电流与电流密度的对应值

电压/V	14.3	18.6	23	26.2	28.2	30.9	40.2
电流/A	0.05	0.1	0.13	0.15	0.17	0.20	0.25
电流密度 /( $\text{A} \cdot \text{m}^2$ )	5.56	11.11	14.44	16.67	18.89	22.22	27.78

#### 1.3.1 试验仪器与分析方法

电源:采用 WYJ5A 60V 直流稳压稳流电源;

浊度:采用 HACH-2100P 浊度仪;

$\text{pH}$ :采用 PHS-3C 型精密酸度计;

$\text{UV}_{254}$ :XIN MAO-752 紫外可见光光度计;

$\text{COD}_{\text{Mn}}$ :检测方法参照《水和废水检测分析方法第四版》。

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交实验设计与结果分析

本实验对影响电絮凝效果的电流密度、极板间距和反应时间为考察因素,以窖水的浊度去除率为目标函数,选用  $L_9(3^3)$  正交实验表来初步确定最佳反应条件,正交试验的因素水平取值如表 3 所示。

正交实验结果分析如表 4 所示。

表 3 正交试验因素水平 A, cm, min

编号	A 电流	B 极板间距	C 反应时间
水平 1	0.05	1	5
水平 2	0.10	2	10
水平 3	0.20	3	20

表 4 正交实验分析  $L_9(3^3)$  cm, A, min, %

序号	极板间距	电流	反应时间	浊度去除率
1	1	0.05	10	54.64
2	1	0.15	5	86.45
3	1	0.2	20	87.54
4	2	0.05	20	51.00
5	2	0.15	10	79.86
6	2	0.20	5	47.27
7	3	0.05	5	7.14
8	3	0.15	20	68.94
9	3	0.20	10	74.54
$K_1$	288.63	112.78	140.86	
$K_2$	178.13	235.25	209.03	
$K_3$	150.62	209.34	207.48	
$K_{11}$	76.21	37.59	46.95	
$K_{22}$	59.38	78.42	69.68	
$K_{33}$	50.21	69.78	69.16	
极差 R	26.00	40.82	22.72	

注:  $K_i$ 、 $K_{ii}$ 、R 为浊度所对应的实验指标、平均值和极差。

通过以上数据可以看出,影响电絮凝去除窖水浊度的各因素主次顺序为:电流 > 极板间距 > 反应时间,其中电流密度为主要影响因素,极板间距和反

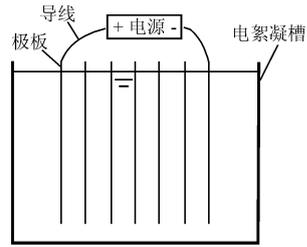


图1 实验装置示意图

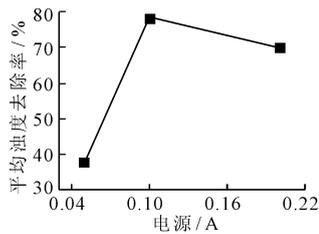


图2 浊度去除率随电流的变化

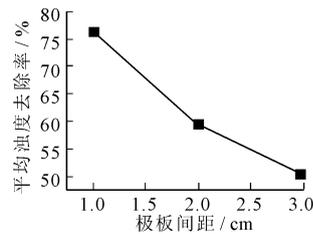


图3 浊度去除率随极板间距的变化

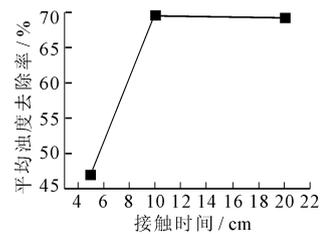


图4 浊度去除率随反应时间的变化

由图2可知,电流在0.1A时所对应的窖水浊度的去除率达到最大值78.42%,此时所对应的电流密度为 $11.11 \text{ A/m}^2$ ;在图3中,窖水的浊度去除效果随着极板间距的增大而减小,在极板间距为1cm处达到浊度去除率的最大值76.21%;通过图4可以看出,在反应时间为10min时,对窖水浊度的去除效果最好,去除率为69.68%。由上分析得出:本实验中电絮凝处理窖水的三因素最优组合为电流密度 $11.11 \text{ A/m}^2$ ,极板间距1cm,反应时间10min,经验证该最优组合对窖水浊度的去除率为87.86%。

## 2.2 单因素实验分析结果

2.2.1 电流密度对浊度去除效果的影响 控制极板间距为1cm,反应时间10min,通过改变电流密度来研究对原水浊度的去除效果的影响,如图5。

由图5可见,电絮凝对窖水浊度去除有着明显的效果,随着电流密度的增加,出水浊度呈整体下降趋势,窖水浊度去除率整体呈上升趋势,由浊度去除率曲线可得知:浊度去除率在电流密度为 $18.89 \text{ A/m}^2$ 时达到最大,浊度去除率为91%,所对应的出水浊度为0.85 NTU,当电流密度 $< 18.89 \text{ A/m}^2$ 时,出水浊度去除效果较为明显,但出水浊度仍在1NTU以上;随着电流密度的增大,当电流密度 $\geq 18.89 \text{ A/m}^2$ 时,出水浊度曲线趋于平缓,维持在1NTU以下。通过浊度去除率曲线可以看出浊度去除率略有降低,这是由于电流密度过高时,会产生过量的 $\text{Al}^{3+}$ ,胶体表面电荷发生逆转,形成胶体排斥,絮体被破坏,絮凝能力下降<sup>[9]</sup>。在时间一定的情况下,随着电流密度的增加,一方面所消耗的能耗也随之增加,造成电能的浪费,另一方面会加速电极的极化和钝化,降低处理效果,因此,介于技术和经济角度的综合考虑,建议采用的电流密度为 $18.89 \text{ A/m}^2$ 时为最佳,这一结论与曲久辉等人所建议采用的电

流密度为 $20 \sim 25 \text{ A/m}^2$ 较为接近。

应时间则次之。电流密度、极板间距和反应时间对浊度去除的影响如图2,图3,图4所示。

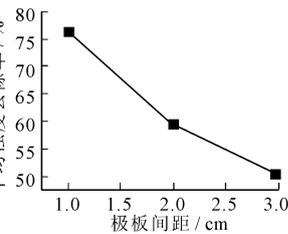


图3 浊度去除率随极板间距的变化

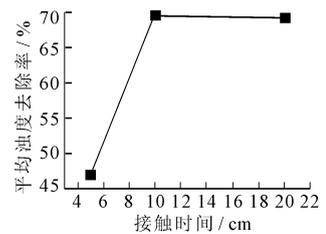


图4 浊度去除率随反应时间的变化

2.2.3 反应时间对浊度去除效果的影响 电解中的反应时间是影响污染物去除的一个重要因素<sup>[12]</sup>。

控制电流密度为 $18.89 \text{ A/m}^2$ ,极板间距为1cm,通过改变反应时间来研究对水窖水浊度的去除效果,并确定最佳反应时间,见图7,图8。

如图7所示,通过出水浊度曲线来看,随着时间的增加,出水浊度呈下降趋势,在 $T < 13 \text{ min}$ 时,电絮凝对浊度的去除效果逐渐上升,当 $T = 13 \text{ min}$ 时,出水浊度最好,为0.7 NTU,去除率为92.94%,这是由于随着时间的增加,阳极产生的 $\text{Al}^{3+}$ 也就越多,从而促进了絮体的形成; $T > 13 \text{ min}$ 时浊度下降趋于平缓,出水浊度并在0.78~0.97 NTU之间,浊度去除率89.86%~91.98%。如图8所示,随着时间

的增加,出水浊度呈下降趋势,在 $T < 13 \text{ min}$ 时,电絮凝对浊度的去除效果逐渐上升,当 $T = 13 \text{ min}$ 时,出水浊度最好,为0.7 NTU,去除率为92.94%,这是由于随着时间的增加,阳极产生的 $\text{Al}^{3+}$ 也就越多,从而促进了絮体的形成; $T > 13 \text{ min}$ 时浊度下降趋于平缓,出水浊度并在0.78~0.97 NTU之间,浊度去除率89.86%~91.98%。如图8所示,随着时间

的增加,出水浊度呈下降趋势,在 $T < 13 \text{ min}$ 时,电絮凝对浊度的去除效果逐渐上升,当 $T = 13 \text{ min}$ 时,出水浊度最好,为0.7 NTU,去除率为92.94%,这是由于随着时间的增加,阳极产生的 $\text{Al}^{3+}$ 也就越多,从而促进了絮体的形成; $T > 13 \text{ min}$ 时浊度下降趋于平缓,出水浊度并在0.78~0.97 NTU之间,浊度去除率89.86%~91.98%。如图8所示,随着时间

的增加能耗呈上升趋势,但是当反应时间过长时,电絮凝对浊度的去除效果并没有提高,同时造成电能的严重浪费,从图 8 出水浊度曲线和能耗曲线看,反应时间为 13 ~ 15 min 时对浊度的去除效果最好,而

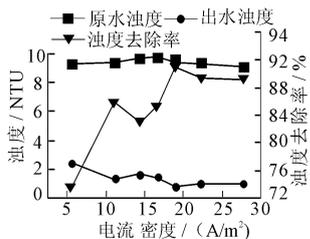


图 5 电流密度对浊度去除效果的影响

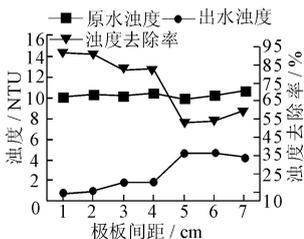


图 6 极板间距对浊度去除效果的影响

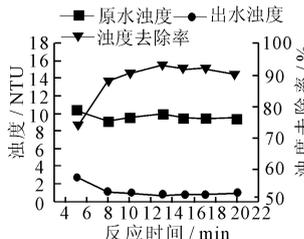


图 7 反应时间对浊度去除效果的影响

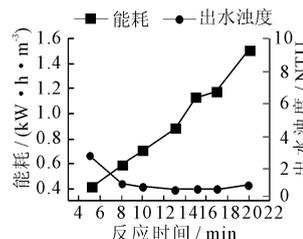


图 8 反应时间对能耗的影响

### 2.3 参数最优组合后对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 的去除效果及 pH 变化的研究

本文在确保电絮凝对浊度最高去除率基础上,对窖水中的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  的去除和 pH 变化情况进行了相关研究。在电流密度为  $18.89 \text{ A/m}^2$ ,极板间距为 1 cm,反应时间为 13 ~ 15 min 的条件下,电絮凝对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  的去除效果及 pH 的变化见表 5。

表 5  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  的去除效果及 pH 变化  $\text{mg/L}$ ,  $\text{cm}^{-1}$ , %

	$\text{COD}_{\text{Mn}}$	$\text{UV}_{254}$	pH
原水	5.00	0.044	8.13 ~ 8.25
出水	3.68 ~ 3.52	0.031 ~ 0.032	8.66 ~ 8.79
去除率	26.40 ~ 29.60	27.27 ~ 29.5	

由表 5 可知,电絮凝对窖水中有机物有一定的去除效果,但并不理想;在反应过程中窖水 pH 有所上升,这是由于阴极发生了  $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$  反应,导致了  $\text{OH}^-$  浓度的升高。

## 3 结果与结论

(1) 通过正交实验与单因素实验的联合分析,得出电絮凝对窖水浊度的去除效果较好,当电流密度、极板间距和反应时间分别为  $18.89 \text{ A/m}^2$ 、1 cm、13 ~ 15 mins 为电絮凝去除浊度的最优组合,对窖水浊度最高去除率为 92.94%。

(2) 本实验表明,电絮凝处理集雨饮用水能耗低,在处理后的水满足国家饮用水卫生标准的条件下,处理 1t 窖水的能耗为  $0.884 \sim 1.19 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ;使用灵活便携,可在西北缺水地区的家庭推广使用。

(3) 在保证对窖水浊度最高去除率的基础上,电絮凝对窖水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  的去除效果并不理想,如何同时兼顾电絮凝对窖水浊度、有机物的去除效

且电能也得到了有效的利用,此时的能耗为  $0.884 \sim 1.19 (\text{kw} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ ,因此综合各因素考虑,认为反应时间在 13 ~ 15 min 为最佳。

果是该作者后续深入研究的方向。

### 参考文献:

- [1] 杨瑞强,朱琨,金星龙等. 窖水的水质分析及水质特点[J]. 甘肃环境研究与监测,2001,14(2):70-71.
- [2] 杨胜. 甘肃“121”雨水集流工程的调查报告[J]. 水资源保护,1997(4):47-50.
- [3] 王刚,李敬苗,丁忠浩. 电凝聚法在垃圾渗滤液处理中的应用[J]. 环境科学与技术,2006,29(8):80-82.
- [4] Chen G, Chen X, Yue P L. Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater[J]. Journal of Environmental Engineering,2000,126(9):858-863.
- [5] Alinsafi A, Khemis M, Pons M N, et al. Electro-coagulation of reactive dyes and textile wastewater[J]. Chemical Engineering and Processing,2005,44(4):461-470.
- [6] Abuzaaid N S, Bukhari A A, Al-Hamouz ZM. Groundwater coagulation using soluble stainless steel electrodes[J]. Advance in Environmental Research,2002,6(3):325-333.
- [7] 曲久辉,刘会娟,等. 水处理电化学技术与原理[M]. 北京:科学出版社,2007:209-210.
- [8] Bottero J Y, Axelos M, Tchouber D, et al. Mechanism of formation of aluminum trihydroxide from Keggin  $\text{Al}_{13}$  polymers[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1987, 118(1):47-57.
- [9] 程宇婕,冯启言,李向东,等. 电絮凝-过滤法去除源水中微量有机物[J]. 环境科学与技术,2007,30(8):86-88.
- [10] 李静波,赵璇,解明曙,等. 电絮凝-微滤去除水中腐殖酸的实验研究[J]. 内蒙古师范大学学报,2007,36(3):339-341.
- [11] 胡勇有,陈兰英,隋军. 电凝聚法去除地热水中氟的研究[J]. 环境污染与防治,1997,19(4):14-16.
- [12] Mahmut Bayramoglu, Mehmet Kobya, Orhan Taner Can. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2004,37(2):117-125.