

天津渤海湾海水淡化预处理工艺的试验研究

张大群 王庆文

(天津水工业工程设备有限公司, 天津 300070)

摘要 针对渤海湾海水低温低浊、有机物、胶体物质、悬浮物以及细菌等指标较其他海域高的特点,采用“强化混凝— O_3 /UV 消毒”作为海水淡化蒸馏法工艺的预处理工艺,当 $FeCl_3$ 、聚丙烯酰胺(PAM)和聚氯化铝(PAC)的投加量分别为 4 mg/L、0.3 mg/L 和 0.5 mg/L,反应温度为 15 °C, O_3 投加量为 2.4 mg/L,UV 辐射剂量为 10 W/L,UV/ O_3 的接触时间为 10 min 时,原水的浊度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 及细菌去除率分别为 96%、40%、19%和 99.91%。经核算,该工艺的单位生产成本为 0.782 元/ m^3 ,单位经营成本为 0.411 元/ m^3 。

关键词 海水淡化 预处理 强化混凝 臭氧消毒 紫外消毒

Experimental study on the desalination pretreatment process of Tianjin Bohai Gulf

Zhang Daqun, Wang Qingwen

(Tianjin Water Industry Engineering & Equipment Co., Ltd., Tianjin 300070, China)

Abstract :According to the characteristics of the water qualities in Bohai Gulf, such as low temperature, low turbidity, relatively high content of organic, colloidal substances, suspended solids and germ compared with other ocean zones, the process of the combination of advanced coagulation and O_3 /UV disinfection was employed as desalination pretreatment. When the dosage of $FeCl_3$, polyacrylamide (PAM) and polyaluminium chloride (PAC) was 4 mg/L, 0.3 mg/L and 0.5 mg/L respectively, the temperature was 15 °C, the dosage of O_3 was 2.4 mg/L, UV radiation dosage was 10 W/L and the contact time of UV/ O_3 was 10 minutes, the removal ratio of the turbidity, COD_{Mn} , UV_{254} and germ in raw water was 96%, 40%, 19% and 99.91% respectively. Through calculation, the production cost of this process is 0.782 YUAN/ m^3 , the operating cost is 0.411 YUAN/ m^3 .

Keywords :Desalination; Pretreatment; Advanced coagulation; O_3 disinfection; UV disinfection

水资源是基础性自然资源和战略性经济资源,水资源的可持续利用是关系到我国经济社会发展的重大战略问题。天津淡水资源紧缺,但拥有丰富的海水资源,国家已将滨海新区的开发开放列入“十一五”发展规划的重点内容之一,这将对该地区水资源的开发利用提出更高的需求,而海水利用是解决滨海新区水资源需求矛盾的重要措施之一。目前,海水淡化技术已经相对成熟,制约海水淡化技术、工程

推广应用的主要矛盾集中在其预处理工艺,它直接关系海水淡化工艺的投资及运行成本。2006 年 2 月颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》提到“海水淡化课题中要重点研究开发海水预处理技术”。由于渤海湾现状海水水质较差,预处理工艺将直接关系淡化工艺的成败,因此拟采用“强化混凝—过滤—消毒”作为渤海湾海水预处理工艺,预处理出水水质应达到蒸馏法需要的进水水质。

1 渤海湾海水水质指标 (见表 1)

表 1 渤海湾海水水质指标

项目	数值
浊度/ NTU	3.0~58.2, 随气候变化
pH	8.15
COD _{Mn} / mg/L	1.73~6.52
TSS/ mg/L	5.15~350, 随气候变化
总铁/ mg/L	0.587
可溶硅/ mg/L	1.63
总硬度(以 CaCO ₃ 计)/ mg/L	5 631
总碱度(以 CaCO ₃ 计)/ mg/L	153.7
电导率/ S/cm	4.03×10^{-2}
细菌总数/ 个/mL	2.2×10^6

2 试验装置及方法

2.1 强化混凝试验

2.1.1 试验装置

烧杯试验: 分别取原海水 800 mL, 加入三氯化铁和聚氯化铝(PAC), 以 200 r/min 快速搅拌 10 s, 120 r/min 中速搅拌 20 s, 然后加入聚丙烯酰胺(PAM)以 80 r/min 慢速混合 10 min, 静沉 20 min。分别测定上清液的浊度、COD_{Mn}、UV₂₅₄和 pH。

动态试验: 试验装置如图 1 所示。Q = 10 L/h, 混凝反应器内设置高低液位计, 下端设置排泥阀定期排泥, 混凝反应需要的水力条件由鼓风机通过位于反应器底端的穿孔曝气管提供。

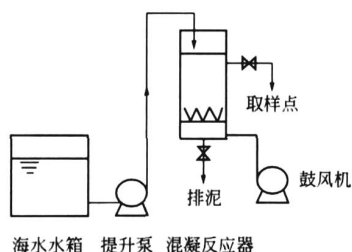


图 1 动态强化混凝试验

2.1.2 分析方法

监测指标按照国家标准《海洋监测规范》(GB 17378.7—1998)“海水分析”部分^[1]的规定进行。主要监测指标、分析方法如表 2 所示。

2.2 消毒试验

2.2.1 试验装置

以混凝试验的出水作为消毒试验的研究对象。

紫外线消毒试验: 紫外灯(8 W, 254 nm, 浸没深

表 2 分析及仪器

项目	分析方法	仪器
温度	表层水温表法	温度计
浊度	便携式浊度仪法	HACH-2100P 便携式浊度仪
pH	玻璃电极法	PHS-3C 精密酸度仪
COD _{Mn}	碱性高锰酸钾法	电热板、电磁搅拌器
UV ₂₅₄	分光光度法	TU-1800 紫外线/可见分光光度仪

度 24 cm)。

臭氧消毒试验: 臭氧发生器(0~2.0 NL/min, 臭氧产量 0.6 g/h), 曝气器。

脉冲电解消毒试验: 自组装脉冲电解装置(5 A, 5.3~6.0 V, 倒电极频率 1 s)、石墨电极(L × W × H = 15 cm × 3 cm × 0.5 cm, 间距 3 cm), 磁力搅拌器。

2.2.2 分析方法

消毒试验主要监测指标为细菌总数, 采用生物显微镜直接计数法。

3 结果与讨论

3.1 强化混凝试验

3.1.1 正交试验确定混凝最佳反应条件

在海水净化过程中, 经常采用三价铁盐混凝剂。考虑到冬季渤海湾海水会出现低温低浊的现象, 为强化混凝效果, 拟采用 FeCl₃、PAC 与 PAM 絮凝剂复配使用。药剂的投加顺序为 FeCl₃、PAC 和 PAM, 投加量及反应温度及正交试验结果如表 3 所示。

表 3 混凝剂复配试验及极差分析数据

试验	FeCl ₃ 投加量/ mg/L	PAC 投加量/ mg/L	PAM 投加量/ mg/L	温度/ °C	剩余浊度/ NTU
1	4	0.5	0.1	15	1.16
2	4	1	0.3	25	1.42
3	4	2	0.5	35	1.28
4	5	0.5	0.3	35	1.26
5	5	1	0.5	15	0.93
6	5	2	0.1	25	0.88
7	6	0.5	0.5	25	1.21
8	6	1	0.1	35	0.99
9	6	2	0.3	15	0.93
I _j	3.86	3.63	3.03	3.02	
II _j	3.07	3.34	3.61	3.51	
III _j	3.13	3.09	3.42	3.53	
R _j	0.79	0.54	0.58	0.51	

3.1.2 正交试验结果分析

根据表 3 得出以下结论:

(1) 各因素对浊度去除率影响的主次: FeCl_3 、PAM、PAC、温度。

(2) 确定混凝反应的最佳工艺条件: FeCl_3 、PAM 和 PAC 的投加量分别为 4 mg/L、0.3 mg/L、0.5 mg/L, 温度为 15 °C。

3.1.3 动态混凝试验

3.1.3.1 对浊度的去除效果

由图 2 可知, 原水经复配混凝剂处理后, 出水浊度基本稳定在 1 NTU 以下, 最小值为 0.88 NTU, 浊度的平均去除率为 96 %。

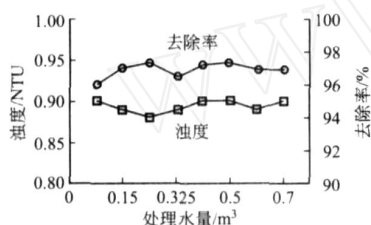


图2 浊度的去除效果

复配混凝剂处理渤海湾海水确保了出水的澄清度, 增大了絮凝的强度、絮体的粒度和吸附活性, 提高了后续构筑物(如沉淀池、滤池)的处理能力, 减少了单一药剂的用量, 扩大絮凝反应的有效 pH 范围, 使絮凝反应更加充分。

3.1.3.2 对 COD_{Mn} 的去除效果

由图 3 可看出, 强化混凝对 COD_{Mn} 的去除率平均为 40 %, 最高值达 53 %。随着处理水量的增加, COD_{Mn} 的去除率有所降低。主要原因是由于原水放置了一段时间后, 水中的有机污染物逐渐被分解, 导致原水的 COD_{Mn} 去除率降低。

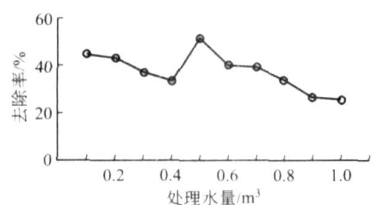


图3 COD_{Mn} 的去除效果

3.1.3.3 对 UV_{254} 的去除效果(见图 4)

原水 UV_{254} 平均为 0.077 cm^{-1} , 经混凝处理后出水的 UV_{254} 平均为 0.062 cm^{-1} , 平均去除率为

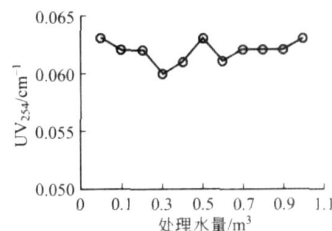


图4 UV_{254} 的去除效果

19 %。说明原水中含有一定的腐殖酸、木质素、丹宁和各种芳香族等含苯环的化合物, 而强化混凝对其有一定的去除效果。

3.2 消毒试验

3.2.1 紫外线消毒试验

3.2.1.1 紫外线消毒效果

设原水初始细菌总数为 N_0 , N 为剩余细菌总数, 则细菌的残留率定义为 N/N_0 , 试验中取 $-\lg(N/N_0)$ 作为数据处理的结果。

表4 紫外线消毒试验

UV 辐照时间 / min	剩余细菌总数 $N/10^5$ 个/mL	细菌去除率 / %	$-\lg(N/N_0)$
30	17.5	20.45	0.10
60	8.36	62.03	0.42
100	5.5	75.01	0.60
120	3.8	82.73	0.76
165	2.5	88.64	0.95
185	2.1	90.45	1.02
270	1.8	91.82	1.09
320	1.78	91.91	1.10

如表 4 所示, 随着反应时间的增长, 细菌的去除率逐渐增加, 当消毒时间达 270 min 时, 细菌的去除率达到 91.82 %。

3.2.1.2 紫外线消毒的光生化反应动力学

在混合均匀, 光程较短(小于 1 cm)的消毒区域内, 杀菌速率可以近似地采用一级光生化反应动力学方程表示:

$$\frac{dN}{dt} = -K_i N \quad (1)$$

式中 N ——存活的微生物个体数量;

t ——辐照时间;

K ——杀灭速率常数, 与微生物杀灭的具体条件有关;

i ——辐照强度。

式(1)表示杀菌效率是辐照光强度的零级反应,是细菌浓度的一级反应。根据紫外线的杀菌机理分析,光化学反应的速度受温度的影响较小。对式(1)进行积分,得到式(2):

$$\frac{N}{N_0} = \exp(-Kit) \quad (2)$$

N_0 为初始的微生物数量。对式(2)两边取对数,可知微生物的存活率 N/N_0 与辐射剂量 it 呈直线关系。如图 5 所示,紫外线剂量与剩余细菌存活率的负对数有较好的相关性,由拟合曲线可知,紫外线消毒的光生化反应动力学方程为 $N = N_0 \cdot 10^{-0.005t}$ 。

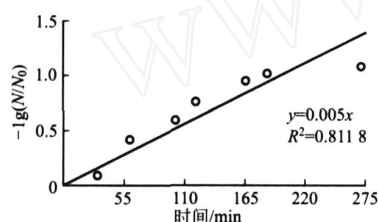


图 5 UV 消毒效果

3.2.2 臭氧消毒试验

3.2.2.1 臭氧消毒效果

当海水水样 pH 为 7.48 时,考察臭氧投加量分别为 1.2 mg/L 和 2.4 mg/L 时,臭氧对海水的消毒效果。由表 5 可知,随着消毒时间的增长,细菌的去除率呈增长趋势。当接触时间为 30 min 时,臭氧投加量为 1.2 mg/L 和 2.4 mg/L 时,细菌的去除率分别为 90.45 % 和 94.54 %,说明臭氧剂量的增加提高了消毒的效果。

表 5 臭氧的消毒试验结果

臭氧投加量 / mg/L	O ₃ 接触时间 / min	细菌去除率 / %	- lg(N/N ₀)
1.2	5	31.82	0.17
	10	60.00	0.40
	20	76.36	0.63
	25	88.18	0.93
	30	90.45	1.02
2.4	5	50.00	0.30
	10	61.82	0.42
	20	85.00	0.82
	25	91.82	1.09
	30	94.54	1.26

3.2.2.2 pH 对臭氧消毒效果的影响

在 O₃ 投加量为 1.2 mg/L、反应时间为 20 min 条件下,考察不同 pH (0.65, 2.06, 7.67, 8.62, 12.31, 13.97) 时, O₃ 对海水的消毒效果。由表 6 可知,水质呈强酸性或碱性时,臭氧的消毒效果要优于中性时的效果,且碱性条件下细菌的去除率要稍高于酸性时的去除率。

表 6 不同 pH 时臭氧的消毒效果

pH	细菌去除率/ %	- lg(N/N ₀)
0.65	87.56	0.85
2.06	83.27	0.78
7.67	81.76	0.74
8.62	85.01	0.82
12.31	87.67	0.91
13.97	89.55	0.98

3.2.2.3 臭氧消毒动力学

如图 6 所示,当水温为 22~25 °C 时,考察臭氧投加量的大小对海水中细菌去除效果的影响。

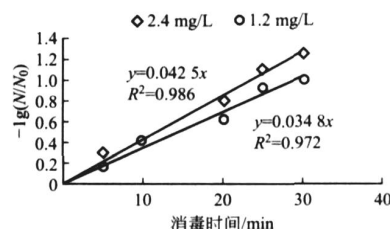


图 6 臭氧消毒效果(pH = 7.48)

对图 6 进行回归分析,并得到相应的回归方程:

$$-lg(N/N_0) = 0.0348t \quad (3)$$

$$-lg(N/N_0) = 0.0425t \quad (4)$$

由 R^2 可知,回归均高度显著,细菌的残留率与消毒时间的关系可以表示为:

$$N = N_0 \cdot 10^{-0.0348t} \quad (1.2 \text{ mg/L}) \quad (5)$$

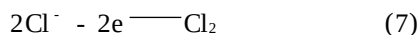
$$N = N_0 \cdot 10^{-0.0425t} \quad (2.4 \text{ mg/L}) \quad (6)$$

由图 6 可以看出,不同臭氧剂量曲线的斜率有差异。当臭氧投加量由 1.2 mg/L 增加到 2.4 mg/L 时,曲线斜率大约增加了 18 %。

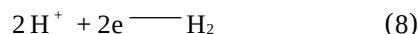
3.2.3 脉冲电解消毒试验

海水中盐类的主要成分为 NaCl,还有 K₂SO₄、CaSO₄ 等无机盐。通过电解海水可以产生 OCl⁻ 离子,进而生成 HOCl,可对海水进行消毒。

电解海水法的阳极反应为:



阴极反应为:



其他反应为:



由以上反应式可知,电解海水消毒的原理与加氯法消毒相同。由于海水中含有大量的 Cl^- ,因此海水预处理可充分利用海水自身的化学组成采用电解法消毒,以省去配置电解质溶液、购置新的消毒设备。

试验中,固定脉冲电流 5 A 和倒电极频率 1 s,考察电解时间和细菌去除率之间的关系。由表 7 可知,随着电解反应时间的增加,细菌的去除率呈增长趋势,但增长比较缓慢。

表 7 电解法消毒效果

反应时间 / min	剩余细菌总数 / 10^5 个/mL	细菌去除率 / %	$-\lg(N/N_0)$
20	15	31.82	0.16
40	12	45.45	0.27
70	8.2	62.73	0.43
90	7.0	68.18	0.50
120	6.1	72.27	0.56
150	4.9	77.72	0.65

对比相同反应时间下,UV、 O_3 和电解消毒这三种方式,以电解消毒对细菌的去除率最低。究其原因,可能是试验中电极选择的问题。本试验采用了石墨电极,由于海水的高度腐蚀性,导致去除效果不理想。然而,脉冲电解法有一个突出的特点:该装置具备倒电极功能,可通过控制倒电极频率使生物膜无法附着于电极上,减少了化学、物理清洗的次数,提高了消毒效率和系统运行效率。因此,随着对电解海水消毒法电极研究的完善,研制出适合于海水消毒的电极材料和电极涂层将具有较好的应用前景。

3.2.4 O_3 —UV 协同消毒试验

3.2.4.1 O_3 —UV 消毒效果的考察

通过以上试验可知,单独使用 UV 或 O_3 对海水消毒在较短时间内效果有限,如要达到较高的细菌去除率,需通过延长反应时间或加大反应剂量的方式,这将导致增加处理构筑物的规模、增大设备的装机容量。由于海水自身的浊度和悬浮物的影响,使部

分细菌被这些细小颗粒所包裹,紫外线或臭氧无法有效地穿透它,因此在短时间内不能达到理想的消毒效果。因此,试验采用 O_3 —UV 组合工艺对海水进行消毒(臭氧投加量为 2.4 mg/L,紫外灯 8 W)。

表 8 O_3 —UV 消毒效果

反应时间 / min	剩余细菌总数 / 10^5 个/mL	细菌去除率 / %	$-\lg(N/N_0)$
3	8.8	60.13	0.4
5	6.0	72.66	0.56
7	3.0	86.36	0.87
15	1.6	92.71	1.14
20	1.1	95.37	1.30

由表 8 可知,当反应时间为 20 min 时,细菌的去除率可达 95.37%,缩短了反应时间,臭氧和紫外线联用起到协同增效杀菌作用,对海水杀菌消毒有显著的效果。

采用正交试验对 O_3 —UV 消毒试验参数进行优化组合,试验结果和各因素水平如表 9 所示。

3.2.4.2 正交试验结果分析

(1) 各因素对细菌去除率影响的主次关系为: O_3 流量,UV 照射时间,臭氧反应时间,pH。

表 9 O_3 —UV 消毒正交试验

项目	O_3 投加量/ mg/L	UV 照射 时间/min	O_3 反应 时间/min	pH	$-\lg(N/N_0)$
1	1.2	10	5	8.83	0.61
2	1.2	15	7	9.21	0.65
3	1.2	20	10	13.46	0.69
4	2.0	10	7	13.46	0.86
5	2.0	15	10	8.83	0.71
6	2.0	20	5	9.21	0.73
7	2.4	10	10	9.21	1.65
8	2.4	15	5	13.46	0.79
9	2.4	20	7	8.83	0.92
I_j	1.95	3.12	2.13	2.24	
II_j	2.3	2.15	2.43	3.03	
III_j	3.36	2.34	3.05	2.34	
R_j	1.41	0.97	0.92	0.79	

(2) 确定较好的工艺条件: O_3 投加量和接触时间分别为 2.4 mg/L 和 10 min,UV 辐射剂量和辐射时间分别为 10 W/L 和 10 min,pH 为 9.21。在此条件下细菌的去除率为 99.91%。

安庆市城东污水处理厂改良型 A²/O 工艺的设计与运行

樊 杰¹ 张碧波² 陶 涛¹ 游桂林³

(1 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074; 2 中国市政工程中南设计研究院, 武汉 430010;

3 安庆市城东污水处理厂, 安庆 246003)

摘要 安庆市城东污水处理厂是安庆市的第一座城市污水处理厂, 利用德国政府贷款修建。该厂总规模为 24 万 m³/d, 近期规模为 12 万 m³/d, 采用两点进水 A²/O 工艺, 90% 的污水进入厌氧区, 10% 的污水进入预缺氧选择池, 好氧区采用 3 个串联的方形曝气池, 不同于国内 A²/O 工艺中多采用的廊道曝气池。具体介绍了两点进水 A²/O 工艺的设计参数及运行效果, 出水水质可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 B 标准。

关键词 A²/O 工艺 两点进水 脱氮除磷 方形曝气池

1 工程概况

安庆市城东污水处理厂位于安庆市东郊的魏家嘴处、石油公司石油库西侧, 总占地面积为 14.3 hm², 其中近期工程占地 9.9 hm², 是安庆市兴建的第一座城市污水处理厂。进水中包括 80% 的生活污水和 20% 的工业废水。工程总规模 24 万 m³/d, 近期规模 12 万 m³/d, 采用两点进水 A²/O 工

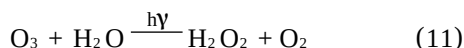
艺, 设计进出水水质见表 1, 出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 B 标准。

表 1 城东污水处理厂设计进出水水质

项目	COD _{Cr} / mg/L	BOD ₅ / mg/L	SS / mg/L	NH ₃ -N / mg/L	TN / mg/L	TP / mg/L
设计进水	300	150	200	25	35	3
设计出水	≤60	≤20	≤20	≤8	≤20	≤0.5

3.2.4.3 O₃-UV 协同作用的杀菌机理

O₃-UV 联用对海水消毒具有较高的细菌去除率。分析认为, O₃ 在水中可以产生 H₂O₂, H₂O₂ 再在 UV 的照射下能产生大量的次生氧化剂, 诸如羟基自由基(·OH)等, 提高了单一使用 O₃ 的消毒效率。



据相关研究表明, 每 1 mol O₃ 在 UV 辐射下可以产生 2 mol 的 ·OH 自由基。且碱性条件下对 O₃ 分解产生自由基比较有利, 因此在投加 O₃ 的同时进行 UV 照射, 能明显提高 O₃ 的氧化能力(光致氧化作用), 提高消毒效果。此外还有可能完全去除有机碳和水中的三卤甲烷。

4 结论

天津渤海湾海水的水质具有低温低浊、有机物、胶体物质、悬浮物以及细菌等较其他海域高的特点, 采用“强化混凝—O₃/UV 消毒”作为其预处理工艺, 当 FeCl₃、PAM 和 PAC 的投加量分别为 4 mg/L、

0.3 mg/L 和 0.5 mg/L, 反应温度为 15 °C, O₃ 投加量为 2.4 mg/L, UV 辐射剂量为 10 W/L, UV、O₃ 的接触时间均为 10 min 时, 浊度、COD_{Mn}、UV₂₅₄ 及细菌的去除率分别为 96%、40%、19% 和 99.91%。经核算, 其单位生产成本为 0.782 元/m³, 单位经营成本为 0.411 元/m³, 该预处理海水的方法是一种经济、可靠、实用且抗冲击负荷较强的预处理工艺。

参考文献

- 1 国家标准化管理委员会. 中国强制性国家标准汇编环境保护卷. 第 3 版. 北京: 中国国家标准出版社, 2003. 376~558

○通讯处: 300070 天津市南开区卫津路 73 号嘉利中心

1904~1908 室 天津水工业工程设备有限公司

电话: 13803026068

E-mail: twiee@public.tpt.tj.cn

收稿日期: 2008-07-17

修回日期: 2008-08-06