

顺序氯化对微生物、副产物和生物稳定性的综合控制

陈超¹, 张晓健¹, 何文杰², 韩宏大², 朱玲侠¹, 王云¹, 刘静¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 天津市自来水集团有限公司, 天津 300040)

摘要: 在中试规模试验中, 研究了“短时游离氯后转氯胺的顺序氯化消毒工艺”对微生物、消毒副产物和生物稳定性指标的控制效果。该顺序氯化消毒工艺综合利用了游离氯消毒灭活微生物迅速彻底, 氯胺消毒副产物生产量低的特点, 通过氯化消毒技术的组合, 安全经济地实现了消毒卫生学和消毒副产物指标的双重控制。该消毒工艺对细菌总数、异养菌平板计数、总大肠菌群指标的控制效果略好于传统游离氯消毒, 对脊髓灰质炎病毒和大肠杆菌 f₂ 噬菌体的灭活效果与游离氯相同。相同原水条件下, 顺序氯化消毒工艺比游离氯消毒工艺产生的三卤甲烷浓度减少 35.8%~77.0%; 卤乙酸减少 36.6%~54.8%。消毒进水质越差, 顺序氯化消毒工艺在消毒副产物控制方面就越有优势。该工艺对生物稳定性指标的控制效果明显高于游离氯消毒。

关键词: 消毒; 游离氯; 氯胺; 顺序氯化; 消毒副产物; 细菌; 病毒

中图分类号: TU 991.25; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)01-0074-06

Simultaneous Control of Microorganism, Disinfection By-Products and Bio-Stability by Sequential Chlorination Disinfection

CHEN Chao¹, ZHANG Xiao-jian¹, HE Wen-jie², HAN Hong-da², ZHU Lin-xia¹, WANG Yun¹, LIU Jing¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tianjin Waterworks Group Co. Ltd, Tianjin 300040, China)

Abstract: A new safe chlorination disinfection process, the sequential disinfection process with short-term free chlorine plus chloramines was investigated its efficiency on control of indices of microorganism, disinfection by-products and bio-stability. This disinfection process may take the advantage of free chlorine's quick inactivation of microorganism and chloramines' low DBP yield and long term residual. Thus, both control of microorganisms and DBPs can be achieved effectively and economically. The pilot test results show that safe chlorination disinfection process has a little better efficiency on total bacteria count, HPC and total coliform count than free chlorination disinfection, which indicate that free chlorine and chloramines might have the synergetic disinfection effect for their different attacking targets. It also had the same inactivation efficiency on polio virus and coliphage f₂ as free chlorination in 120 minutes contact time. Sequential chlorination disinfection process could reduce 35.8%~77.0% yield of trihalomethane and 36.6%~54.8% yield of haloacetic acids. The poorer quality the water had, the more advantage the safer chlorination disinfection had than free chlorination disinfection one. Moreover, sequential chlorination had better efficiency on bio-stability control than free chlorination.

Key words: disinfection; free chlorine; chloramines; Sequential chlorination; disinfection by-products; bacteria; virus

传统的氯消毒工艺主要有 3 种: 游离氯消毒工艺消毒效果好, 但存在消毒副产物生成量高、健康风险大的不足, 此外游离氯在供水管网中的衰减速度快, 难以维持管网末梢足够的余氯。氯氨消毒工艺通常是在清水池前加氯, 出厂水处再加氨, 以维持管网水余氯, 并减少氯味, 但在加氯后已在清水池中形成较多的消毒副产物。个别水厂采用氯与氨同时投加, 以化合物氯胺进行消毒的工艺, 所生成的消毒副产物比游离氯消毒少, 但是氯胺的消毒效果较差^[1,2]。

本课题组开发了一种新型安全氯化消毒工艺——“短时游离氯后转氯胺的顺序消毒工艺”, 并已经申请专利(申请号 200410042790.6)^[3,4]。在水厂消毒工艺中, 先加入氯进行游离氯消毒, 经过一个较短的接触时间(一般小于 15min)后再向水中加入

氨, 把水中的游离氯转化为氯胺, 继续进行氯胺消毒, 并在清水池中保持足够的消毒接触时间。在使用中应根据水质的不同(如水温、pH、细菌学指标、消毒副产物前体物浓度或有机物含量), 选择适当的加氯量、游离氯消毒时间和适当比例的氨。清水池采用特殊的构造以满足调整短时游离氯消毒接触时间和池上加氨后的混合要求。

该顺序氯化消毒工艺的主要原理是: 游离氯灭活水中细菌病毒的速度快, 其 99% 灭活病毒的 *ct*

收稿日期: 2004-11-23; 修订日期: 2005-01-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601140); 国家自然科学基金重点项目(50238020)

作者简介: 陈超(1977~), 男, 博士, 主要研究方向为给水排水消毒理论与技术, E-mail: chen.water@mail.tsinghua.edu.cn

值小于 $5\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{min})$,通常浓度下 $5\sim 15\text{min}$ 就已能达到较好的灭活效果;而游离氯消毒时生成消毒副产物需要一定的时间.氯胺的消毒效果也较稳定,但是比游离氯所需消毒时间长;氯胺消毒生成的消毒副产物的量少,速度慢.因此,先采用较短时间的游离氯消毒,在消毒副产物尚未大量生成时再把游离氯转为氯胺继续消毒,通过游离氯和氯胺的顺序消毒过程达到较好的消毒效果,所产生的消毒副产物的量也较低.该工艺综合利用了游离氯消毒灭活微生物迅速彻底,氯胺消毒副产物生产量低的特点,通过氯化消毒技术的组合,安全经济地实现了微生物学和消毒副产物指标的双重控制.

1 材料与方法

1.1 原水

中试试验在天津市自来水公司某水厂进行,试验用原水和该水厂相同,均为通过引黄济津工程引来的黄河水.由于河水在北大港水库中存放时间较长,水质较差.

1.2 水处理工艺

中试现场采用2套并联运行的工艺流程,如图1所示.

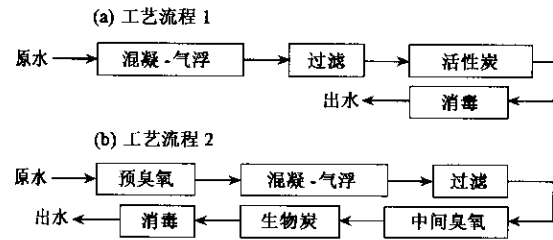


图1 中试工艺流程
Fig.1 Flow diagram of pilot test

本文重点讨论消毒工艺,对前序处理工艺不做过多介绍.消毒工艺包括传统的游离氯消毒和顺序氯化消毒工艺——短时游离氯后转氯胺消毒工艺.2组消毒工艺可以与不同前处理工艺连接.消毒用氯采用水厂生产管线中的氯水,浓度大约为 $600\sim 1\,000\text{mg}/\text{L}$,事先将氯水储存在储罐中标定后用计量泵准确投加.消毒用氨用分析纯的浓氨水稀释至 $200\text{mg}/\text{L}$ 并标定后用计量泵准确投加,氯氨比为 $4:1$.调节加氯加氨量,控制接触池 120min 出水余氯 $1.0\sim 1.5\text{mg}/\text{L}$,与水厂控制指标相同.消毒工艺如图2所示.消毒接触池是2个容积为 2.5m^3 的不锈钢水箱,每池进水流量 $Q=1.25\text{m}^3/\text{h}$,总的水力停

留时间 120min .每个消毒接触池在进水端即消毒接触池水力停留时间 0min 处设置加氯阀;在与加氯阀相距水力停留时间为 $5、10、15\text{min}$ 处设置3个加氨阀,可以根据需要选择其中一个加氨.根据实验室研究结果^[3]和保证出水余氯满足 $1.0\sim 1.5\text{mg}/\text{L}$ 的要求,此次中试试验选择加氨的时间为 10min .另外消毒接触池设置6个取样口,水力停留时间分别为 $5、10、15、30、60、120\text{min}$.

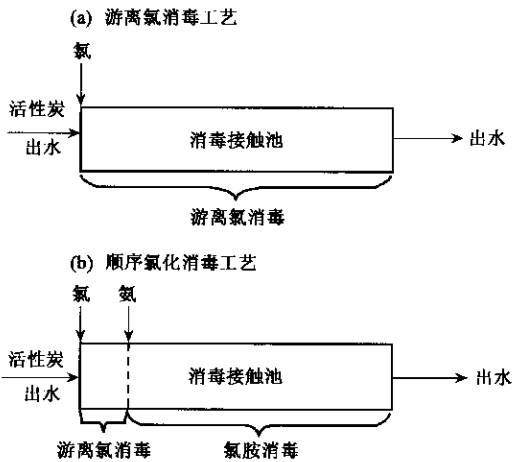


图2 中试系统消毒工艺
Fig.2 Disinfection processes of pilot test

1.3 分析指标和方法

试验中采用的分析指标和方法如表1所示.

表1 水质测定指标及方法		
Table 1 Analytical indices and methods		
指标	测试方法	备注
余氯 ^[4,5]	DPD-硫酸亚铁铵滴定法	可分别测定游离氯、3种氯胺
余氯	邻联甲苯胺比色法	测定总氯,与DPD法作对照
氨氮	纳氏试剂分光光度法	
水温	水银温度计	
pH	上海雷磁pH计	
细菌总数	平板计数法	营养琼脂
HPC(异养菌平板计数)	平板计数法	R2A培养基,20℃培养9d
总大肠菌群	滤膜法	
脊髓灰质炎病毒	加标富集-Vero细胞感染法	委托军事医学科学院测试
大肠杆菌f ₂ 噬菌体	加标富集-噬菌斑法	委托军事医学科学院测试
三卤甲烷(THMs)	顶空气相色谱法	
卤乙酸(HAAs)	衍生化气相色谱法	可测试美国环保局标准中的5种卤乙酸
AOC(可同化有机碳)	P17+NOX	

2 结果与分析

2.1 消毒卫生学指标控制

2.1.1 细菌学指标控制

取 2 号流程活性炭出水进行 2 种消毒工艺对细菌灭活效果的比较.测试了各水力停留时间时的余氯,中和余氯后测试了剩余的细菌总数、异养菌平板计数(HPC)和总大肠菌群,数据如表 2 所示.

表 2 消毒工艺对细菌学指标的控制效果								
Table 2 Control of bacteria indices by disinfection processes								
水力停留时间/min	0	5	10	15	30	60	120	
游离氯	余氯/mg·L ⁻¹	3.00	2.55	2.26	2.18	1.98	1.66	1.44
	细菌总数/CFU·mL ⁻¹	350	20	0	0	0	0	0
	HPC/CFU·mL ⁻¹	6 900	30	0	2	0	6	2
	总大肠菌群/CFU·L ⁻¹	650	25	0	0	0	0	0
	余氯/mg·L ⁻¹	2.5	1.91	1.75	1.65	1.60	1.36	1.23
顺序氯化	细菌总数/CFU·mL ⁻¹	350	20	2	1	1	0	0
	HPC/CFU·mL ⁻¹	6 900	6	0	6	0	0	0
	总大肠菌群/CFU·L ⁻¹	650	55	10	10	0	0	0

由于游离氯的消耗速度比氯胺快,为了保持 120min 接触时间后余氯保持基本一致并满足余氯为 1.0~1.5mg/L 的控制要求,游离氯消毒的投氯量为 3mg/L,顺序氯化消毒的投氯量为 2.5mg/L,10min 投加 0.5mg/L 氨使游离氯转化成一氯胺,氯氨比约为 4:1.比较 2 种消毒工艺的余氯数据可以发现,转为氯胺后余氯消耗速度减慢,在满足最终余氯要求的条件下可减少消毒剂用量,因此增加的氨

的费用可以被节省的氯的消耗所抵消.

由表 2 可知,2 种消毒工艺对细菌总数、HPC、总大肠菌群的控制效果相当.120min 取样口细菌总数、总大肠菌群无检出,均优于我国水质标准的要求.HPC 也优于美国水质标准中小于 500CFU/mL 的要求.

游离氯灭活微生物速度较快,10min 后 3 种指标均未检出.但随水力停留时间延长,HPC 略有波动上升,最终出水中仍然有检出,可能是细菌聚集成团或者存在一定的修复机制而导致出水 HPC 略有上升^[4].重复性试验也证实了该现象的存在.

相对而言,顺序氯化时细菌总数、总大肠菌群的灭活速度小于游离氯消毒,但是最终出水中 3 种指标均未检出,没有出现 HPC 读数增加的现象,显示短时游离氯后转氯胺消毒在灭菌效果上有一定优势,氯和氯胺可能存在协同消毒作用,具体机理有待后续试验研究.

2.1.2 病毒灭活试验

取中试 2 号流程活性炭出水,委托军事医学科学院进行游离氯和顺序氯化消毒工艺对病毒的灭活试验.将原水分分为对照组、加氯组和顺序氯化组,每组 10 L,向每组原水中加入一定量的标准病毒株.试验中向后 2 组水样中加入消毒剂,消毒剂投加量满足 120min 消毒时间后余氯 1.0~1.5mg/L,与水厂和中试试验中相同.由于脊髓灰质炎病毒测试复杂,消毒 20min 后取样中和消毒剂,只测试了剩余大肠杆菌 f₂ 噬菌体.消毒 120min 后中和消毒剂,测试剩余大肠杆菌 f₂ 噬菌体和脊髓灰质炎病毒浓度.数据如表 3 所示.

表 3 消毒工艺消毒灭活病毒效果 ¹⁾						
Table 3 Results of virus inactivation						
分组	20min 消毒后	大肠杆菌 f ₂ 噬菌体		杀灭率/%	脊髓灰质炎病毒 1 型	
	/PFU	杀灭率/%	120min 消毒后 /PFU		120min 消毒后 /PFU	杀灭率/%
对照组	3.76×10 ⁶		3.05×10 ⁶		8.0×10 ⁷	
游离氯消毒	0	>99.999 9	0	>99.999 9	0	>99.999 99
顺序氯化消毒	0	>99.999 9	0	>99.999 9	0	>99.999 99

1)PFU 为病毒噬菌斑形成单位

由试验数据可见,游离氯消毒和顺序氯化消毒工艺对病毒的灭活效果没有差别.120min 消毒后,水中大肠杆菌 f₂ 噬菌体、脊髓灰质炎病毒均没有检出,灭活率大于 99.999 9% 和 99.999 99%;2 种消毒工艺消毒 20min 后水中大肠杆菌 f₂ 噬菌体没有检出,灭活率大于 99.999 9%.

2.2 消毒副产物指标控制

为了更直接地比较消毒工艺副产物生成的情况,测试了相同消毒进水条件下不同消毒工艺处理 120min 后的副产物生产量,如图 3 所示.

消毒进水选择 1 号流程石英砂滤池出水以模拟常规工艺消毒,图中用“过滤”表示;1 号流程活性炭池出水以模拟常规+活性炭工艺消毒,图中用“炭 1”表示.2 号流程生物活性炭出水以模拟预氧化+常规

+臭氧-生物活性炭工艺消毒,图中用“炭 2”表示.消毒工艺包括游离氯消毒(FCD),氯胺消毒(CMD)和顺

序氯化消毒工艺(SCD),3种消毒工艺投氯量均为2.5mg/L,后2种消毒工艺中氯氨比均为4:1.

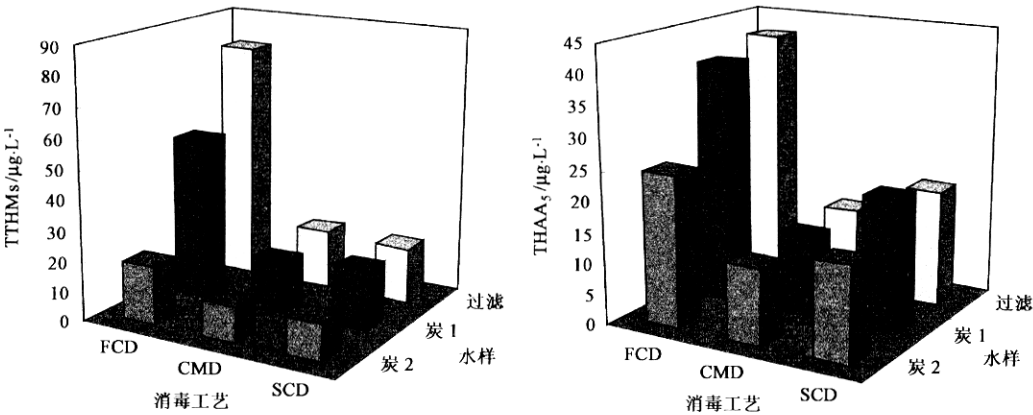


图3 相同进水时不同消毒方法生成副产物比较

Fig.3 Comparison of DBP formation

比较消毒工艺可以发现,在相同进水的情况下,游离氯生成消毒副产物最多,顺序氯化略高于氯胺消毒.以1号流程过滤出水消毒数据为例,游离氯消毒生成的TTHMs和THAA5最高,分别为80.37µg/L和42.06µg/L.采用顺序氯化消毒工艺产生TTHMs18.51µg/L、THAA519.25µg/L.氯胺消毒和顺序氯化消毒差别不大.顺序氯化比游离氯消毒减少77.0%的TTHMs生成量和54.8%的THAA5生成量.在对2号流程活性炭工艺出水进行消毒时,游离氯消毒生成TTHMs19.40µg/L,THAA524.79µg/L.顺序氯化消毒工艺生成TTHMs12.46µg/L,THAA515.65µg/L,减少了35.8%和36.6%.

而考虑消毒工艺进水的差异时可以发现,过滤出水消毒生成副产物的浓度明显高于深度处理工

艺,而且炭1出水消毒后生成副产物的量高于炭2出水消毒.这说明,消毒进水水质越差,前体物浓度也越高,副产物生成量越大.另一方面,传统工艺处理后消毒时,顺序氯化消毒工艺比单纯游离氯消毒减少THMs77.0%、HAAs54.8%,而深度处理后分别减少35.8%和36.6%.说明消毒进水水质越差,短时游离氯后转氯胺的消毒工艺就越有优势.

2.3 顺序氯化消毒工艺中副产物生成特性

测试了2号流程接触池进行顺序氯化消毒时各取样口的消毒副产物,数据如图4所示.

当向接触池加游离氯时,三卤甲烷迅速生成并随时间延长而持续增长.5min时三卤甲烷浓度为14.39µg/L,10min加氨转为一氯胺后三卤甲烷浓度基本保持稳定,呈现随时间缓慢上升的趋势,120min后三卤甲烷总浓度为18.06µg/L.在4种三

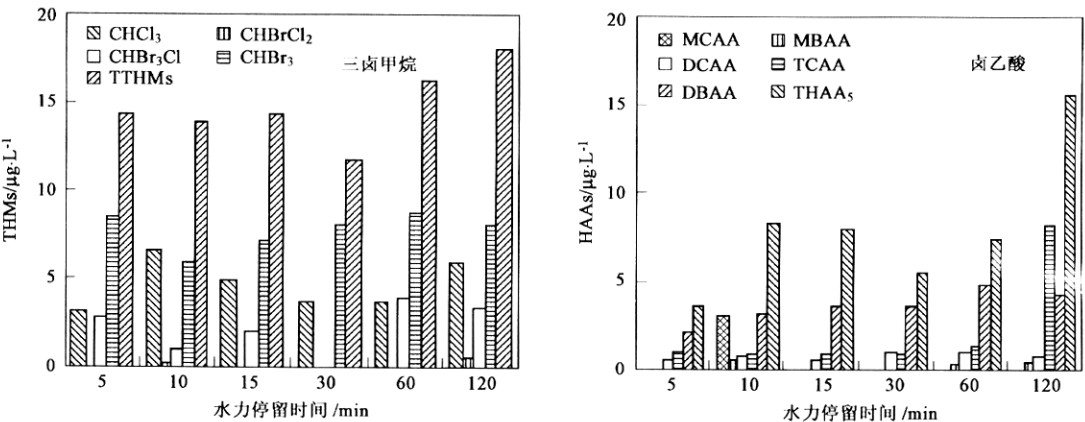


图4 顺序氯化消毒中消毒副产物浓度随水力停留时间变化

Fig.4 Change of DBPs concentrations with HRT in sequential chlorination

卤甲烷中,溴代三卤甲烷占主体,其比例随时间延长波动较大.其中三溴甲烷比例最高,为 43%~69%,二溴一氯甲烷次之,为 0~24%,一溴二氯甲烷几乎无检出,剩下的三氯甲烷占 22%~48%.

顺序氯化消毒接触池中卤乙酸浓度略有波动,仍呈现随时间缓慢上升的趋势.5min 时 HAA₅ 为 3.56 $\mu\text{g/L}$,10min 时为 8.25 $\mu\text{g/L}$,加氯后卤乙酸浓度先略有下降而后上升,120min 后卤乙酸总浓度为 15.54 $\mu\text{g/L}$.在 5 种卤乙酸中,溴代卤乙酸占主体,除 120min 时比例为 29% 外,占总卤乙酸的比例基本稳定在 44%~69%.其中二溴乙酸浓度持续上升,所占比例呈随时间延长而升高的趋势.三氯乙酸随时间延长而增加,120min 后浓度为 8.22 $\mu\text{g/L}$,占总卤乙酸的 53%.一氯乙酸、一溴乙酸和二氯乙酸浓度较低.

2.4 生物稳定性指标控制

可同化有机碳(AOC)是评价水中生物稳定性的常用指标.为了研究消毒工艺对管网水生物稳定性的控制效果,对 2 个消毒接触池出水进行了 AOC 测试,结果如图 5 所示.

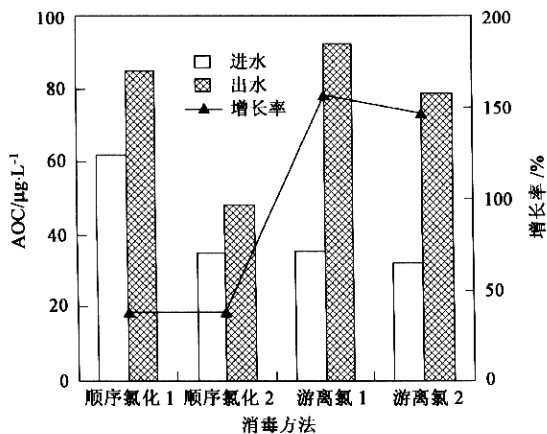


图 5 不同消毒方法对生物稳定性的控制效果比较

Fig. 5 Comparison of effects on bio-stability

2 次测试中顺序氯化消毒进水 AOC 浓度有较大差异,分别是 35 $\mu\text{g/L}$ 和 60 $\mu\text{g/L}$.但是安全氯化消毒工艺后 AOC 的增长率均为 37.1%.2 次测试中游离氯消毒进水 AOC 浓度差别不大,分别是 36 $\mu\text{g/L}$ 和 32 $\mu\text{g/L}$,经过 120min 游离氯消毒后,AOC 浓度增加了 155.6% 和 146.9%.

造成 AOC 增加的原因是消毒剂的氧化作用.游离氯是一种强氧化剂,可以把较大分子量较难生物降解的有机物氧化分解成较小分子量较易为生物同化的有机物.在 120min 的消毒接触时间内会造成水

中 AOC 大量增加,在管网中 AOC 会导致细菌的再生长,造成用户水中细菌超标等生物稳定性大大降低的问题.相比而言,顺序氯化消毒工艺中游离氯消毒的时间只有 10min,而且一氯胺的氧化能力较弱,不会产生大量较小分子量较易为生物同化的有机物,因而顺序氯化消毒后管网水中的生物稳定性不会有明显降低.

3 讨论

3.1 卫生学指标控制

3.1.1 灭菌机理

通常而言,游离氯灭活微生物的 *ct* 值仅是相同效果时一氯胺 *ct* 值的 1%~5%.从试验数据来看,短时游离氯后转氯胺的顺序氯化消毒工艺略优于单纯氯消毒,说明游离氯和氯胺消毒可能因为攻击的位点不同而存在一定程度的协同效应.

游离氯作为一种广谱高效的消毒剂,会影响微生物的多种重要功能,但首先是通过其强氧化性破坏微生物的表层,如细菌的细胞膜^[7],使其通透性增强,导致细胞内容物如蛋白、RNA 和 DNA 漏出,干扰多种酶系统,使细菌代谢无法进行.

氯胺的氧化性较弱,但是氯胺同样会破坏膜的完整性,因而能影响膜的渗透性和细菌的呼吸,并能对细胞的重要代谢功能造成不可逆的损害. Ingols 等指出,一氯胺和次氯酸均能将亚铁血红素转变呈氯化高铁血红素的结构,这可能是一氯胺灭活细菌的主要原因.而 Shih 等发现,一氯胺可使枯草杆菌的 DNA 发生断裂,并使 DNA 的转化活性降低,对内切酶分裂的敏感性增强.

短时游离氯后转氯胺的顺序氯化消毒工艺略优于游离氯消毒,其可能的原因是:较短时间的游离氯在灭活大部分微生物的同时,也破坏了剩余微生物的细胞膜等生理屏障,如造成细胞膜通透性增强,控制物质转运和外排的酶系统破坏从而有利于氯胺进入细胞内部,而氯胺会通过损害核酸而使细菌彻底灭活,从而表现出一定程度的协同作用.由于试验条件限制,上述推断现无法证实,有待于进一步试验研究.

3.1.2 灭活病毒效果

由试验数据可见,游离氯消毒和顺序氯化消毒工艺对病毒的灭活效果没有差别.120min 消毒后,水中大肠杆菌 f₂ 噬菌体、脊髓灰质炎病毒均没有检出,灭活率大于 99.999 9%;2 种消毒工艺消毒 20min 后水中大肠杆菌 f₂ 噬菌体没有检出.

Chang、Olivieri 等认为,游离氯对病毒的灭活与衣壳蛋白的变性有关;氯使噬菌体 f_2 死亡的最初原因是损害了基因组。

Olivieri 研究表明无机氯胺和游离氯灭活噬菌体 f_2 时,最先损害的部位出现在 RNA 片段上。氯胺灭活脊髓灰质炎病毒的主要机理与损害衣壳蛋白有关。Shin^[8] 对一氯胺灭活 Norwalk 病毒、脊髓灰质炎病毒、大肠杆菌 MS-2 噬菌体的灭活结果用感染试验和 RT-PCR 进行了分析,结果表明 RT-PCR 的结果明显小于感染试验,说明一氯胺灭活首先攻击病毒衣壳蛋白。

顺序氯化消毒对病毒的灭活效果和游离氯消毒相同,其灭活机理可能是游离氯或氯胺首先攻击衣壳,在造成衣壳蛋白变性和破坏的情况下进一步渗透进病毒内部损害核酸。

3.2 消毒副产物指标控制

游离氯与水中前体物,如腐植质反应生成三卤甲烷、卤乙酸的反应通常被认为是含甲基酮的组分被次氯酸或羟基亲电诱导异构,而后与次氯酸进行加成的结果^[9]。试验证明,游离氯反应生成消毒副产物的速度较快。一氯胺生成消毒副产物的反应较慢,估计是先经过水解生成次氯酸,而后进行上述加成反应,由于一氯胺的水解十分缓慢,因而生成副产物的速度同样较小。

在顺序氯化消毒的系统中,最初存在着游离氯、氯和消毒副产物前体物 3 类物质。游离氯与氯反应生成一氯胺的反应十分迅速彻底。在通常水温 and pH 下,加氯并充分混合后水中余氯均以一氯胺形式存在。由于游离氯生成了一氯胺,副产物的生成速率大大降低,从而达到了控制消毒副产物的目的。

此外,试验中发现生成了较高比例的溴代消毒副产物,如图 4 所示。120min 时三卤甲烷中浓度最高的是三溴甲烷,占 44.8%,溴代三卤甲烷占总数的 66.8%。卤乙酸中 5min 到 60min 的数据中浓度最高的一直是二溴乙酸。

由于原水中溴离子浓度相对较高,游离氯(或次氯酸)迅速将其氧化成次溴酸。而次溴酸与前体物的反应活性明显高于次氯酸,因此生成了较多的溴代三卤甲烷和卤乙酸。在接触池中加氯后,次氯酸和次溴酸与氯快速反应生成一氯胺和一溴胺,而后经过缓慢的水解反应生成次卤酸并最终生成消毒副产物,使得消毒副产物的生成反应速度大大降低。但是加氯没有改变溴与前体物反应活性强于氯的性质,因此仍然是溴代副产物占主体。

4 结论

(1)从消毒卫生学试验数据来看,短时游离氯后转氯胺的顺序消毒工艺略优于单纯氯消毒,出水中细菌总数、HPC 和总大肠菌群无检出,说明游离氯后转氯胺消毒可能因为攻击的位点不同而存在一定程度的协同效应。

(2)游离氯消毒和顺序氯化消毒工艺对病毒的灭活效果没有差别。120min 消毒后,水中大肠杆菌 f_2 噬菌体、脊髓灰质炎病毒均没有检出,灭活率大于 99.999 9% 和 99.999 99%; 2 种消毒工艺消毒 20min 后水中大肠杆菌 f_2 噬菌体没有检出。

(3)从消毒副产物指标来看,在采用出水水质较差的常规工艺出水进行消毒时,顺序氯化消毒比游离氯消毒产生的三卤甲烷浓度减少 77.0%, 卤乙酸减少 54.8%。在采用出水水质较好的预臭氧 + 常规 + 臭氧-生物活性炭工艺出水进行消毒时,前者比后者产生的三卤甲烷浓度减少 35.8%, 卤乙酸减少 36.6%。消毒进水水质越差,短时游离氯后转氯胺的消毒工艺在消毒副产物控制方面就越有优势。

(4)顺序氯化工艺对管网水生物稳定性的控制效果明显优于游离氯消毒。游离氯消毒后 AOC 浓度增加了约 150%, 而顺序氯化后 AOC 浓度仅增加 37.1%。

致谢:感谢 863 课题“北方地区安全饮用水保障技术”参加单位:天津自来水公司、哈尔滨工业大学、西安建筑科技大学、南开大学、中国科学院生态环境中心的研究人员对中试运行设备的共同维护。

参考文献:

- [1] 许葆玖. 给水处理理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000. 460~487.
- [2] 王丽花,周鸿,王占生,等. 常规工艺对消毒副产物及前体物的去除[J]. 给水排水, 2001, 27(4): 35~37.
- [3] Chen Chao, Zhang Xiaojian. Reduction of disinfection by-products with short-term free chlorine plus chloramines disinfection process[A]. In 4th IWA World Water Congress and Exhibition [C]. Marrakech: Morocco, 2004. Paper ID 24973.
- [4] 张晓健,陈超,何文杰,等. 顺序氯化消毒工艺对消毒副产物的控制[J]. 中国给水排水, 2004, 20(9): 13~16.
- [5] Alicia C Diehl, Gerald E Speitel Jr, James M Symons, et al. DBP formation during chloramination[J]. American Water Works Association Journal, 2000, 92(6): 76~90.
- [6] Andrew D, Eaton, Lenore S, Clesceri, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 19th edition. Washington DC: Am. Pub. Health Assoc., 1995.
- [7] 蔡宏道. 现代环境卫生学[M]. 北京:人民卫生出版社, 1995. 567~578.
- [8] Shin G A, et al. Reduction of Norwalk virus, poliovirus 1 and coliphage MS2 by monochloramine disinfection of water[J]. Water Science and Technology, 1998, 32(12): 151~154.
- [9] Johannes J Rook. Chlorination reactions of fulvic acids in natural waters[J]. Environmental Science and Technology, 1977, 11(5): 478~482.