

# 输配水系统中水体余氯的衰减规律研究

徐洪福<sup>1</sup>, 赵洪宾<sup>1</sup>, 张金松<sup>2</sup>, 尤作亮<sup>2</sup>, 任月明<sup>1</sup>, 王宇锋<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 深圳市水务<集团>有限公司, 广东 深圳 518031)

**摘要:** 研究了输配水系统中水体余氯的衰减动力学及其影响因素, 发现用传统的一级反应模型模拟氯的衰减规律不够准确, 因不同时间段的衰减系数是变化的; 采用多点加氯并调整投加比例可以降低耗氯量, 单纯的预臭氧化会提高滤后水的需氯量。

**关键词:** 输配水系统; 余氯衰减; 分段模拟; 预臭氧化

**中图分类号:** TU991.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2003)08-0015-04

## Study on the Residual Chlorine Decay in Water Transmission and Distribution System

XU Hong-fu<sup>1</sup>, ZHAO Hong-bin<sup>1</sup>, ZHANG Jin-song<sup>2</sup>, YOU Zuo-liang<sup>2</sup>,  
REN Yue-ming<sup>1</sup>, WANG Yu-feng<sup>2</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Shenzhen Water Affairs <Group> Co. Ltd., Shenzhen 518031, China)

**Abstract:** In the study of residual chlorine decay kinetics in water transmission and distribution system and its affecting factors, it was found that use of traditional first order reaction to simulate chlorine decay is not so accurate, multi-point chlorination and adjustment of dosing ratio will reduce the chlorine consumption, and pre-ozonation alone will increase the chlorine demand of filtered water.

**Keywords:** water transmission and distribution system; residual chlorine decay; simulation by sections; pre-ozonation

余氯在输配水系统中的衰减主要来自两方面: 水体耗氯和管壁耗氯<sup>[1]</sup>。水体是指供水管道中由边界层至管轴之间的水体部分, 这部分水体中的余氯消耗与外界环境无关, 是氯与水中无机和有机组分反应的结果。水体耗氯从水厂投加氯的时刻就开始了, 而管壁耗氯是在水流出清水池时才发生, 故研究余氯衰减规律应从加氯点开始。

### 1 材料和方法

#### 1.1 仪器与试剂

HACH 便携式余氯仪, 气相色谱仪, 下口瓶, 氯水。

#### 1.2 试验方法

取滤后水人工投加氯水(有效氯在投加前标定), 将容器密闭后置于阴暗处保存。按选定的时间间隔取样检测有关的水质参数。

### 2 结果与分析

#### 2.1 氯反应动力学

传统的余氯模拟方法将氯衰减过程视为一级动力学<sup>[2]</sup>, 假定氯在水中按照一级动力学衰减, 并且衰

减速率不随时间而改变。在这种假设条件下对试验数据进行拟合,并以最小二乘法估计获得衰减常数  $k$ 。

事实上氯与水中物质的反应属于复杂反应<sup>[3,4]</sup>,初期总反应速率较快,反应中占主导地位的是易与氯反应的物质(难与氯反应的物质在此期间也参与反应,但其反应速率与前者相比很小,故可忽略不计);在接下来的时段总反应速率较慢,易与氯反应的物质基本反应完全,这时剩余的难与氯反应的物质则占主导地位。

通过上述分析,获取氯在水体中的衰减系数需进行分段模拟。由于氯在加入水中极短的一段时间内反应速率相当快,故难以对其规律进行模拟,实际上也没有必要。根据试验结果,选定模拟初始时间点为 20 min,从不同初始氯浓度条件下衰减系数的变化曲线可以看出,各曲线在 1 680 min 处都发生了较为明显的变化,故将 1 680 min 处作为分段点。直线拟合参数见表 1,两个时段氯衰减系数的直线拟合结果见图 1、2。

从表 1 和图 1、2 可以看出:

- ① 两时段的相关系数都在 0.98 以上,说明曲线拟合良好;
- ② 两时段的直线截距都近似等于零,所以可视为直线通过原点,即在每个时段内氯衰减速率近似为常数,可以利用一级动力学表达式来描述;
- ③ 对于不同的初始氯浓度,第二时段的衰减系数比第一时段都有不同程度的降低,说明氯衰减系数本身在减小。

表 1 两时段氯衰减系数的直线拟合参数

初始氯浓度 (mg/L)	第一时段			第二时段		
	衰减系数 (min <sup>-1</sup> )	截距	相关系数	衰减系数 (min <sup>-1</sup> )	截距	相关系数
2.36	0.000 4	0.030 0	0.998 9	0.000 1	-0.000 1	1.0
3.16	0.000 3	0.017 6	0.993 6	0.000 2	0.000 4	0.994 4
4.24	0.000 3	0.028 6	0.991 1	0.000 2	0.017 7	0.982 7

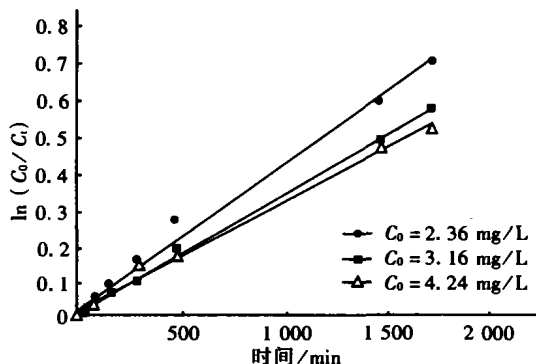


图 1 第一时段衰减系数的直线拟合结果

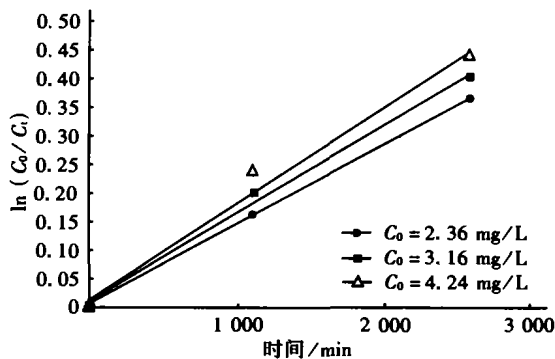


图 2 第二时段衰减系数的直线拟合结果

## 2.2 温度的影响

在化学反应的影响因素中,温度对反应速率的影响是最明显的,为此进行了 3 个不同温度(18、22、26 ℃)下的氯衰减试验,其间水样保持恒温、避光、静置。3 种温度下的余氯衰减曲线见图 3,在 20 min 到 1 440 min 时间段内各温度下余氯衰减系数曲线的拟合情况见图 4。

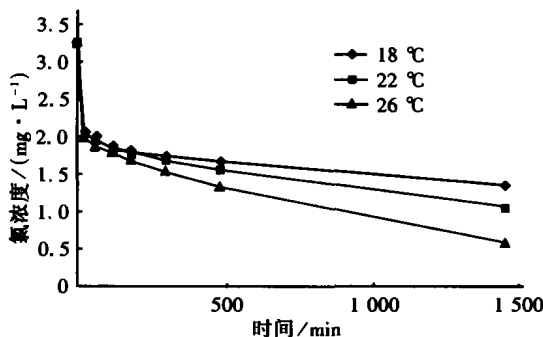


图 3 三种温度下的氯衰减曲线

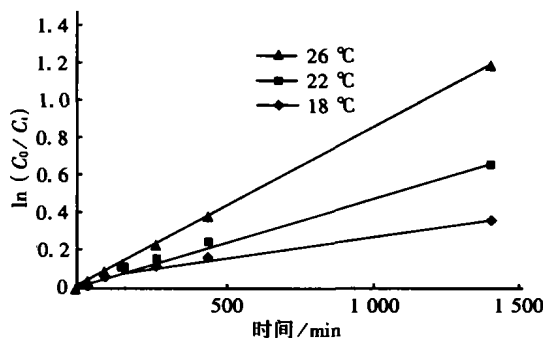


图 4 三种温度下氯衰减系数的直线拟合结果

将试验数据代入 Arrhenius 方程<sup>[5]</sup>,计算得到其反应活化能  $E = 125\ 377.5\ \text{J}$ ,指前因子  $k_0 = 6.393\ 64E + 18$ ,以及温度对氯在主体水中反应速率影响的经验公式:  $k = (6.393\ 64E + 18) \exp[-\frac{125\ 377.5}{8.314 \times T}]$ ,由此经验公式计算得到的不同温度下

氯在水体中的衰减系数如表 2 所示。

表 2 不同温度下的氯衰减系数

温度(°C)	5	10	15	20	25	30
$k$ ( $\text{min}^{-1}$ )	1.77E -05	4.61E -05	1.16E -04	2.84E -04	6.73E -04	1.55E -03

### 2.3 加氯点与加氯量

由不同初始浓度下氯的衰减变化曲线可以看出,在初始氯浓度较高时,氯衰减速率较快,而在初始氯浓度较低时,氯衰减速率较慢。这是因为氯与水体中物质的反应是复杂反应,反应物的初始浓度影响了某些反应的发生。在初始氯浓度高时,相对较难与氯反应的物质也参与了复合反应,与初始浓度较低时相比,副反应所造成的氯衰减速率较为明显,所以消耗了较多的氯。

通过以上分析,可以考虑在水处理工艺中对加氯点和加氯量进行优化以降低耗氯量,保证配水管网中维持较高的余氯。试验的加氯点为滤后水和出厂水处,由于清水池的水力停留时间为 3 h 左右,故两次投氯的间隔定为 3 h。试验结果见图 5。

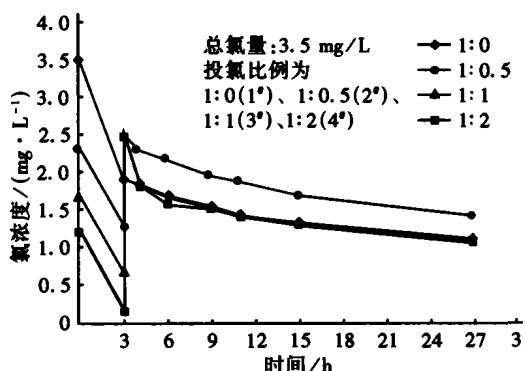


图 5 不同投氯点和投氯量的氯衰减曲线

从图 5 可以看出,在两次加氯之间初次投氯 3.5 mg/L 的水样中氯衰减速率高于其他水样;投氯比例为 1:1 和 1:2 时,二次加氯后的快速反应阶段的氯耗要高于其他水样;投氯比例为 1:0.5 时,在二次加氯后的快速反应阶段氯衰减速率最低,因而水样中会保持较高的余氯。从图 5 还可发现,在二次投氯后的慢速反应阶段所有水样的衰减规律几乎相同。这是因为在慢速反应阶段,容易与氯反应的物质已基本反应完全,此时占主导地位的是难与氯反应的物质与氯之间的反应,所以反应速率与初始氯浓度无关。不同投氯比例时产生的总三卤甲烷 (TTHMs) 和总卤乙酸 (THAAs) 量的试验结果表明,初始加氯量越高,产生的消毒副产物的量就越

大,故无论从降低氯耗的角度,还是从降低消毒副产物产量的角度,都应该降低初次加氯量,但当初次加氯量太低时,易造成二次加氯后快速反应阶段较高的氯耗,使得水中余氯浓度维持在较低的水平。为使两个时段耗氯量之和最小,当两次加氯量比例为 1:0.5 时最佳。

### 2.4 预氧化

研究了不同预氧化方式(预臭氧化和预氯化)对氯衰减变化规律的影响。预臭氧化试验用水为中试装置滤后水,臭氧投量为 2 mg/L;预氯化试验用水为水厂滤后水,加氯量为 2 mg/L。两种预氧化方式下氯的衰减试验结果表明,在其他初始条件都相同时,经过预臭氧化的滤后水耗氯量大于经预氯化后的耗氯量(两者之间的差距发生在氯衰减的快速阶段),不同的预氧化方式对慢速反应阶段氯的衰减速率没有明显的影响。

经过预臭氧化的滤后水耗氯量大于预氯化的滤后水,其原因是臭氧属于强氧化剂,能够将氯所不能氧化的大分子有机物氧化为小分子有机物以及中间产物,而这些小分子有机物和中间产物可以被氯氧化。常规工艺对小分子有机物的去除率较低,而与预氯化相比,经过预臭氧化的滤后水中含有更多的可以与氯反应的有机物,故在加氯后的快速反应阶段耗氯量较高。

### 3 结论

- ① 氯在水体中的衰减是多个平行反应及连串反应的合成结果,属于非基元反应。
- ② 在不同时段氯衰减系数并非为固定常数,传统的一级模型不能准确地模拟整个氯衰减过程,而分段模拟是较为可行的。
- ③ 温度对氯衰减速率系数的影响很明显,可采用 Arrhenius 方程求解。
- ④ 将一次加氯改为多次加氯,并调整投加比例,可以有效地降低氯耗和消毒副产物生成量。
- ⑤ 与预氯化相比,预臭氧化的滤后水耗氯量更高。

### 参考文献:

- [1] John J Vasconcelos, Lewis A Rossman, Walter M Grayman, et al. Kinetics of chlorine decay[J]. Journal of AWWA, 1997, 89(7): 54-65.

- [2] Kiéné L, Lu W, Lévi Y. Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water systems[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(6): 219-227.
- [3] 周鲁, 刘钟海. 复杂反应动力学基础[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994.
- [4] Kastle G J, Fisher I H, Jegatheesan V. Evaluation of chlorine decay kinetics expressions for drinking water distribution systems modeling[J]. Journal of SRT - Aqua, 1999, 48(6): 219-226.
- [5] 郭镛, 唐小恒, 周绪美. 化学反应工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

作者简介: 徐洪福(1975- ), 男, 山东德州人, 博士研究生, 研究方向为给水管网系统优化。  
电话: (0755)26140158 (0451)6282281  
E-mail: xuhongfu@waterchina.com  
收稿日期: 2003-02-24

## · 技术交流 ·

### 消防水箱设计中的常见错误分析

#### 1 将增压水泵出水管作为消防水箱的出水管

如将增压水泵的出水管作为消防水箱的出水管, 导致出水量大大小于规范要求的室内消防用水量, 不能满足扑救初期火灾的水量要求。所以, 设置在屋顶的增压水泵应在其出水管一侧设旁通管, 以保证出水流量不小于扑救初期火灾所需之水量。

#### 2 将消防水箱的出水管从报警阀后的管道接入

有些设计人员将消防水箱的出水管直接接入自动喷淋系统的顶层给水管道(报警阀后), 看似符合压力、流量要求而且节约管材, 其实这也是错误的。因为消防水箱的出水管从报警阀后管道接入后, 水箱中的水将不通过报警阀而直接进入系统管网, 喷头动作后使得报警阀后的管道长时间保持很高的水压, 延缓了压力开关动作, 水力警铃不能及时报警, 水泵迟迟得不到启动, 故《自动喷水灭火系统设计规范》明确要求, 消防水箱出水管应从报警阀入口前的管道接入。

#### 3 未将消防水箱设置在建筑物最高部位

对于某些局部为钢结构屋顶的大空间建筑物(如影剧院的舞台等), 有些设计人员将消防水箱设置在建筑物承重能力相对较好的钢筋混凝土结构的中间层(低于最不利点喷头的高度), 提高了增压水泵的扬程以满足最高点喷头的工作压力要求。设计人员的想法是, 规范说明消防水箱可设增压水泵来满足最不利点消火栓和喷头的压力, 这样理解是错误的, 使消防水箱成了中间水池而不能依靠重力自流向消防系统管道供水。

#### 4 消防水箱出水管未设置单向阀

有些设计对消防水箱采用消防管道供水或消防水泵供水, 经过消防水箱再流入消防管网。此做法减小了消防管网的压力, 不能充分发挥消防设备的作用, 所以应采用生活管道向消防水箱供水, 并在消防水箱的出水管上设单向阀以阻止消防水泵的供水进入消防水箱。

#### 5 一律采用气压罐代替消防水箱

有些多层建筑物的屋顶为钢结构承重构件, 设置消防水箱比较困难, 设计人员通常会考虑采用气压罐来代替。但是对于严重危险级的建筑物则是不允许的(如舞台葡萄架下的雨淋系统), 而只能采用消防水箱供给初期消防用水。

(日照市公安消防分局 辛本顺 供稿)