

# 清水池有效水力停留时间的影响因素

杜志鹏<sup>1</sup>, 刘文君<sup>1</sup>, 张素霞<sup>2</sup>, 张 弥<sup>3</sup>

(1. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 北京自来水集团第九水厂, 北京 100085;  
3. 北京自来水集团第四水厂, 北京 100053)

**摘要:** 为提高清水池的消毒效率并减少消毒副产物生成量, 研究了清水池有效水力停留时间  $t_{10}$  的影响因素。采用示踪试验进行中试模型研究, 长度相似比例为 1:60; 采用计算流体力学(CFD) 模拟示踪试验, 研究了进水流速、拐角数及拐角宽度的影响。试验结果验证了清水池的总长宽比是影响  $t_{10}$  的主要因素。CFD 模拟结果表明: 总长宽比相同时, 拐角数越少  $t_{10}$  越大; 拐角宽度存在最优值范围; 而一定范围内流速的变化对  $t_{10}$  的影响不明显。

**关键词:** 卫生学; 清水池; 有效水力停留时间; 消毒

中图分类号: TU 991.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2007)12-2139-03

## Factors influencing the effective retention time in clearwells

DU Zhipeng<sup>1</sup>, LU Wenjun<sup>1</sup>, ZHANG Suxia<sup>2</sup>, ZHANG Mi<sup>3</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. No. 9 Waterworks, Beijing Waterworks Group, Beijing 100085, China;

3. No. 4 Waterworks, Beijing Waterworks Group, Beijing 100053, China)

**Abstract:** The factors which influence the effective hydraulic retention time ( $t_{10}$ ) of a clearwell were studied to enhance disinfection efficiency and reduce the formation of disinfection by-products. Tracing experiments were conducted in a 1:60 pilot scale model. The flow were also simulated numerically to study the influence of inlet velocity, the corner number, and the corner width. The experiment results verify that the total ratio between the clearwell length and clearwell width is the key factor influencing the effective retention time. The simulations show that the effective retention time decreases with less corners with an optimal range for the corner widths while the inlet velocity had little effect on the effective retention time.

**Key words:** hygiene; clearwells; effective hydraulic retention time; disinfection

少消毒副产物的重要手段, 而衡量清水池水力特性的评价指标<sup>[1-3]</sup>是有效水力停留时间  $t_{10}$  与平均水力停留时间  $t_{av}$  的比值  $t_{10}/t_{av}$ 。清水池总长宽比  $L/W$  是影响  $t_{10}/t_{av}$  的主要因素, 二者在半对数坐标系中呈线性关系。金俊伟的中试研究结论<sup>[4]</sup>为:  $t_{10}/t_{av} = 0.185 \ln(L/W) - 0.044$ 。

为本文利用中试示踪试验和二维计算流体力学 CFD 软件模拟相结合的方法<sup>[5-6]</sup>, 研究了流速、拐角数和导流板长度对清水池  $t_{10}/t_{av}$  的影响。在保持相同总长宽比和进出水条件不变的情况下, 研究进水流速、拐角数及拐角宽度等因素的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 中试研究

为研究实际清水池的水力特性, 依据 Froude 相似准则, 设计了清水池中试置<sup>[4]</sup>。再利用中试装置示踪试验数据, 验证 CFD 方法的准确性。

**药品:** 以氟化钠为示踪剂, 配制氟离子质量浓度为  $\rho_m$  (10 g/L) 的母液。中试装置进水的氟离子质量浓度背景值为  $\rho_0$  (例如,  $\rho_0 = 0.3 \text{ mg/L}$ )。假设清水池为全混式流态, 投加药品后氟离子质量浓度为  $\rho_a$  (例如,  $\rho_a = 5 \text{ mg/L}$ ), 清水池体积为  $V_c$ , 则示踪剂投加质量为  $\Delta m = (\rho_a - \rho_0)V_c$ 。设混合后平均质量浓度为  $\rho_m$ , 可得投加示踪剂母液的体积  $V_m = \Delta m / \rho_m$ 。

**仪器:** ORION 290A 型氟离子电极, 测量精度为  $0.02 \text{ mg/L}$ , 测量误差  $\pm 2\%$ 。

**试验方法:** 示踪剂采用瞬时投加的方法, 即采用脉冲示踪试验。清水池流动属于自由液面的重力流, 中试模型设计采用重力相似准则, 即 Froude 相

收稿日期: 2006-11-23

基金项目: 北京市科技计划重大项目 (D0605004040421)

作者简介: 杜志鹏(1981—), 男(汉), 湖北, 硕士研究生。

通讯联系人: 刘文君, 教授, E-mail: wjlju@tsinghua.edu.cn

改进清水池的设计以优化清水池水力特性是减

似。按定义有

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}}$$

式中:  $v$  为流速;  $g$  为重力加速度;  $l$  为长度。

以北京水源九厂一期二系列清水池(1B)为原型, 设计中试装置。采用模型长度比例尺为1:60。

清水池原型及中试参数见表1。表中:  $L_c$  为清水池池长,  $B$  为池宽,  $H$  为池高,  $v$  为流速,  $q_v$  为体积流量。

表1 中试模型与原型相关参数

参数	比尺	比例	原型	中试
$L_c$	$L_c$	1:60	90m	1.5m
$B$	$L_c$	1:60	90m	1.5m
$H$	$L_c$	1:60	5m	83mm
$v$	$L_c^{0.5}$	1:7.75	0.96m/s	0.124m/s
$t_{av}$	$L_c^{0.5}$	1:7.75	5.48h	42.43min
$q_v$	$L_c^{2.5}$	1:2788.5	1.93m <sup>3</sup> /s	69.2mL/s

### 1.2 CFD 研究方法

CFD 研究清水池水力特性的过程就是用数值计算的方法求解清水池内部流场, 即数值求解模化的Navier-Stokers 方程(紊流模型)。在求解流场后, 模拟示踪试验, 得到液龄函数曲线  $E(t)$ , 对时间积分得到累积液龄函数曲线  $F(t)$ , 进而得到  $t_{10}/t_{av}$  的值。

## 2 试验结果和讨论

### 2.1 中试示踪试验结果

中试示踪试验模拟了清水池中试模型在三导流板和六导流板2种结构情况下的水力特性, 结果如图1、2所示。

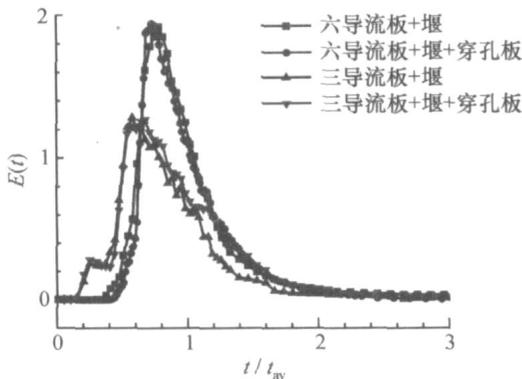


图1 中试示踪试验液龄函数分布

由  $t_{10}$  定义可知,  $F(t) = 0.1$  时所对应的时间即为  $t_{10}$ 。图2中  $F(t) = 0.1$  时经量纲化为1的时间即为  $t_{10}/t_{av}$ 。六导流板的情况下,  $t_{10}/t_{av}$  的数值都较大, 在0.65左右, 此时本清水池模型的总长宽比为49:1,

使用金俊伟的经验公式得到  $t_{10}/t_{av} = 0.67$ , 试验结果与经验公式较为吻合。三导流板时,  $t_{10}/t_{av}$  的数值也达到了0.50, 这时总长宽比为16:1, 使用金俊伟的经验公式得到0.47。由此可见, 总长宽比对提高的  $t_{10}/t_{av}$  的效果是明显的。

由于穿孔板只是设置在进水口附近, 在拐角处并未设置, 因此穿孔板只是小幅度提高了  $t_{10}/t_{av}$ , 效果并不明显。

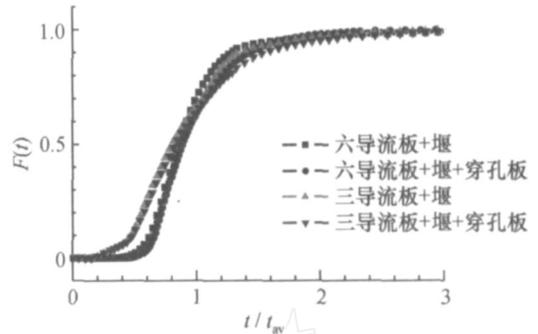


图2 中试示踪试验累积液龄函数分布

### 2.2 二维CFD 模拟准确性的验证

为验证CFD 模拟的准确性, 将实际的中试示踪试验数据与CFD 模拟结果进行比较, 见表2。其中:  $t_w$  是根据中试示踪试验或CFD 模拟示踪试验计算所得数据时间  $t$  对  $E(t)$  的加权平均值,  $\sigma^2$  为方差。

通过CFD 得到的  $t_{10}/t_{av}$  比中试试验大15%左右, 而反映停留时间展形的量纲1方差比中试试验小50%左右。这是因为用二维CFD 模拟三维结构的清水池存在一定的缺陷。  $t_w/t_{av}$  能反应中试示踪试验或CFD 模拟示踪试验的准确性, 该值越接近于1, 则方法越准确。本研究表明二维CFD 模拟的结果满足要求。

表2 中试装置示踪试验与CFD 模拟对比

结构	方法	$t_{10}/t_{av}$	$t_w/t_{av}$	$\sigma^2$
三导流板	中试试验	0.51	1.07	0.359
	CFD 模拟	0.59	0.98	0.145
六导流板	中试试验	0.63	0.97	0.095
	CFD 模拟	0.74	1.05	0.053

### 2.3 进水口流速的影响

图3比较了几种流速情况下CFD 模拟清水池中试模型六导流板(总长宽比为49)的累积液龄函数曲线(其中141mm/s为Froude相似的中试模型实际流速, 34mm/s为等流量平均流速)。

从图3中可以看出, 流速对累积液龄函数的影响不大,  $t_{10}/t_{av}$  的变化范围在10%以内, 且无明显规

律, 因此在模拟计算清水池中试模型和实际清水池的有效水力停留时间的时候, 可以选择实际进口流速或者等流量平均流速, 在本研究的CFD 模拟中采用的是实际进口流速。

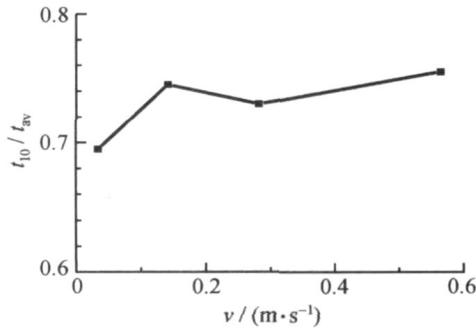


图3 流速对  $t_{10}/t_{av}$  的影响

### 2.4 导流板长度对 $t_{10}/t_{av}$ 的影响

图4 为设置3个导流板结构的清水池平面布置示意图。图中:  $L_c$  为导流板设置方向的清水池模型长度,  $d$  为拐角处的过流宽度;  $W_{ch}$  为廊道宽度。为研究导流板长度的影响, 选定  $d/W_{ch}$  作为衡量指标。

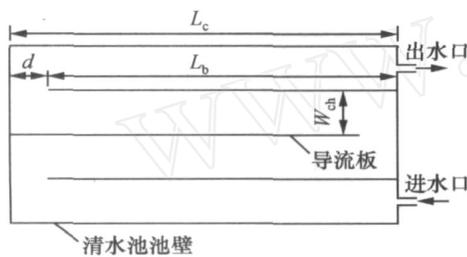


图4 三导流板结构清水池平面布置示意图

以六导流板的清水池中试模型作为模拟对象(即总长宽比为49·1), 导流板长度对于  $t_{10}/t_{av}$  的影响见图5。

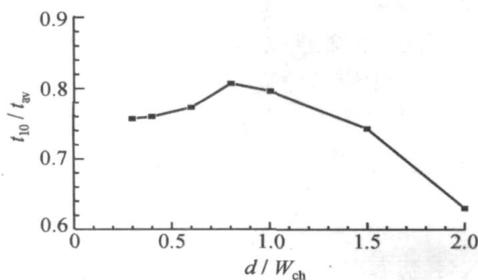


图5 导流板长度对于  $t_{10}/t_{av}$  的影响

当  $d/W_{ch} = 0.8$  左右时,  $t_{10}/t_{av}$  取得最大值; 当  $d/W_{ch} > 1.5$  时,  $d/W_{ch}$  增大会使  $t_{10}/t_{av}$  显著减小;  $d/W_{ch} < 0.8$  时,  $d/W_{ch}$  的减小也会使  $t_{10}/t_{av}$  产生较小幅度的减小。当  $d$  相对于  $W_{ch}$  较大时, 在拐角处会形成较大面积的死区; 当  $d$  相对  $W_{ch}$  较小时, 拐角处的混合作用增强, 流态偏离推流。这2种效应都会导致  $t_{10}/t_{av}$  的减小, 因此  $d/W_{ch}$  存在最优值, 且在 0.8 到 1.0 之间。

2.5 拐角数对  $t_{10}/t_{av}$  的影响

### 2.5 拐角数对 $t_{10}/t_{av}$ 的影响

拐角定义见示意图6。拐角数为  $n$ , 则存在  $n+1$  条廊道。

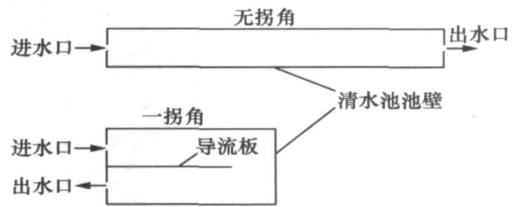


图6 无拐角和一拐角清水池平面布置示意图

图7 是池长和池宽均为 1.5m、拐角数为 0~6 的CFD 模拟结果(流速和导流板长度均相同)。

从CFD 模拟的结果来看, 随着拐角数的增加  $t_{10}/t_{av}$  值逐渐减小, 其中从0拐角到1拐角时  $t_{10}/t_{av}$  下降的幅度较大。随着拐角数的增加, 在拐角处的混合作用越来越强, 流态越来越偏离推流的流态, 因此  $t_{10}/t_{av}$  逐渐减小。

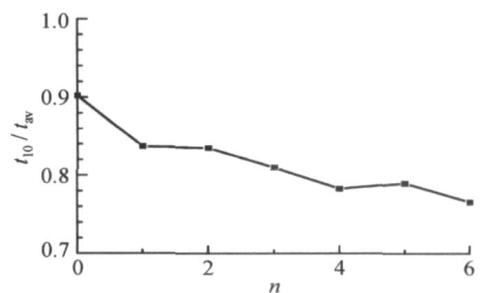


图7 拐角数对  $t_{10}/t_{av}$  的影响

## 3 结论

1) 清水池总长宽比是影响清水池  $t_{10}/t_{av}$  的主要因素;

2) 总长宽比相同时, 一定范围内的流速变化对清水池  $t_{10}/t_{av}$  的影响不大; 拐角宽度与廊道宽的比值 ( $d/W_{ch}$ ) 为 0.8~1.0 时, 清水池  $t_{10}/t_{av}$  值取得最大值; 拐角数目越多, 清水池  $t_{10}/t_{av}$  值越小。

(下转第2145页)

并维持在一个相对较高的水平。当前政策虽然能够实现一定的减排量,但减排效果十分有限,要满足能源安全和温室气体减排的要求,实施更激进的产业与环境政策势在必行。公路交通业有很大的减排潜力。在公路交通业实施减排兼具环境、经济和社会效益。在公路交通业制定减排战略时应当先采用成本较低的措施。短期内一些具体的车辆技术如发动机技术、传动系技术、整车技术和发动机-传动系-整车匹配技术等对于减排具有重大意义,从中长期还可以推进快速公交系统和燃料替换在我国的发展步伐。

### 参考文献 (References)

- [1] 中国汽车工业年鉴编委会 2004 中国汽车工业年鉴 [M]. 北京: 中国汽车技术研究中心, 2004  
The Editorial Board of China Automotive Industry Yearbook. China Automotive Industry Yearbook 2004 [M]. Beijing: China Automotive Technology & Research Center, 2004 (in Chinese)
- [2] 国家环境保护总局 2005 年中国环境状况公报 [R]. 北京: 国家环境保护总局, 2005  
State Environmental Protection Administration of China Environment report of China [R]. Beijing: State Environmental Protection Administration of China, 2005 (in Chinese)
- [3] HE Kebin, HUO Hong, ZHANG Qiang, et al Oil consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China's road transport: current status, future trends, and policy implications [J]. *Energy Policy*, 2005, **33**: 1499 - 1507.
- [4] NG W S, SCHIPPER L. Growing in the Greenhouse: Protecting the climate by putting development first [R]. Washington DC: World Resources Institute, 2005: 49 - 50
- [5] 国家环境保护总局 2004 年中国环境状况公报 [R]. 北京: 国家环境保护总局, 2004  
State Environmental Protection Administration of China Environment report of China [R]. Beijing: State Environmental Protection Administration of China, 2004 (in Chinese)
- [6] Wright L, FULTON L. Climate change mitigation and transport in developing nations [J]. *Transport Reviews*, 2005, **25**(6): 691 - 717.
- [7] International Energy Agency (IEA). Bus systems for the future: Achieving sustainable transport worldwide [R]. France: IEA, 2002
- [8] ZHOU Hongchang, Sperling D. Transportation in development countries: Greenhouse gas scenarios for Shanghai, China [EB/OL]. 2001-07-01. <http://repositories.cdlib.org/itsdavis/UCD-ITS-REP-01-14/>.
- [9] 王克, 王灿, 吕学都, 等 基于LEAP的中国钢铁行业CO<sub>2</sub>减排潜力分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(12): 1982 - 1986  
WANG Ke, WANG Can, LU Xuedu, et al Abatement potential of CO<sub>2</sub> emissions from China's iron and steel industry based on LEAP [J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2006, **46**(12): 1982 - 1986 (in Chinese)
- [10] 霍红 中国公路交通能源消耗及汽车燃料经济性技术和政策研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002  
HUO Hong Study on China's energy consumption of road transport, and technologies and policies of vehicular fuel economy [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002 (in Chinese)

(上接第2141页)

### 参考文献 (References)

- [1] 刘文君, 张金松, 刘丽君, 等 清水池改进设计原理及应用 [J]. 给水排水, 2004, **30**(5): 10 - 12  
L U Wenjun, ZHANG Jinsong, L U Lijun, et al The clearwell design improvement principle and application [J]. *Water & Wastewater Eng*, 2004, **30**(5): 10 - 12 (in Chinese)
- [2] Hannoun I A, Boubs P F. Optimizing distribution storage water quality: A hydrodynamic approach [J]. *Appl Math Modelling*, 1997, **21**(8): 495 - 502
- [3] Hannoun I A, Boubs P F. Using hydraulic modeling to optimize contact time [J]. *J Am Water Works Assoc*, 1998, **90**(8): 77 - 87.
- [4] 金俊伟, 刘文君, 刘丽君, 等 影响清水池  $t_{10}/T$  值的因素试验研究 [J]. 给水排水, 2004, **30**(12): 36 - 39  
J N Junwei, L U Wenjun, L U Lijun, et al Study on the influence factors on  $t_{10}/T$  in clear water tank [J]. *Water & Wastewater Eng*, 2004, **30**(12): 30 - 36 (in Chinese)
- [5] 刘文君, 崔磊 应用计算流体力学优化清水池水力效率 [J]. 中国给水排水, 2005, **21**(5): 1 - 5  
L U Wenjun, CU I Lei Application of computational fluid dynamics for optimization of hydraulic efficiency of clearwell [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, **21**(5): 1 - 5 (in Chinese)
- [6] 王虹, 邵学军, FALCONER R A. 氯接触池中溶质输移与消毒过程的数值模拟 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, **44**(6): 797 - 800  
WANG Hong, SHAO Xuejun, FALCONER R A. Numerical modeling of disinfection processes in chlorine contact tanks [J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2004, **44**(6): 797 - 800 (in Chinese)
- [7] 刘冬, 王虹 蛇形流场紊流数值模拟中代数应力模型的应用 [J]. 水力发电学报, 2001(04): 76 - 84  
L U Dong, WANG Hong Experimental study on concentration fields in a serpentine disinfection tank [J]. *J Hydroelectric Eng*, 2001(04): 76 - 84 (in Chinese)