

中试清水池水力条件对氯消毒效率的影响

柳清¹, 刘文君^{1*}, 高京伟¹, 张素霞²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100031)

摘要:以枯草杆菌黑色变种芽孢为目标微生物, 以紫外线消毒后的炭滤池出水为进水, 在中试清水池模型中模拟氯消毒过程, 通过改变清水池导流板数目获得不同的水力条件, 研究清水池水力条件对氯消毒效率的影响。结果表明, 在本试验中, 不同水力条件下以 Ct_{10} 值计算的 NaClO 对枯草杆菌黑色变种芽孢的灭活系数之间相互一致, 而不同水力条件下以 CT 值计算的 NaClO 对枯草杆菌黑色变种芽孢的灭活系数之间相差很大, 表明 Ct_{10} 是评价清水池消毒效率的合理指标; 在 $Ct_{10} = (100 \sim 300) \text{ mg} \cdot \text{min/L}$ 的范围内, NaClO 对枯草杆菌黑色变种芽孢的灭活系数为 $0.0016 \text{ L}/(\text{mg} \cdot \text{min})$, 与其他研究者的结果具有很好的一致性; 清水池水力条件的改善可以提高消毒效率, 在 $CT = (100 \sim 700) \text{ mg} \cdot \text{min/L}$ 的范围内, 当 CT 值固定时, 随着清水池内导流板数增多, 水力条件得到改善, t_{10} 增加, 目标菌种的灭活率显著提高。

关键词:清水池; 水力条件; 有效水力停留时间; 消毒; 枯草杆菌黑色变种芽孢

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)09-2550-05

Impacts of the Hydraulic Characteristics of Pilot Clearwell on Chlorine Disinfection Efficiency

LIU Qing¹, LIU Wen-jun¹, GAO Jing-wei¹, ZHANG Su-xia²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Waterworks Group, Beijing 100031, China)

Abstract: A pilot clearwell was used to simulate the chlorine disinfection process with the *Bacillus subtilis* spores as the target microbe. The effluent of the activated carbon filter tank was radiated by low pressure UV lamp and then used as the influent the pilot clearwell. The impacts of hydraulic characteristics of pilot clearwell on disinfection efficiency of *Bacillus subtilis* spores was studied under different hydraulic characteristics which was changed by the number of the baffles. Under the conditions of this experiment, the inactivation coefficients of *Bacillus subtilis* spores with NaClO as disinfectant which were calculated by Ct_{10} value were almost same under different hydraulic characteristics, but the inactivation coefficients which were calculated by CT value were very different under different hydraulic characteristics. This verified that it was more reasonable to evaluate the disinfection efficiency by Ct_{10} value than CT value. When Ct_{10} value was in the range of $100 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{min/L}$, the inactivation coefficient of *Bacillus subtilis* spores with NaClO as disinfectant was $0.0016 \text{ L}/(\text{mg} \cdot \text{min})$, which highly coincided with others' results. When CT value was in the range of $100 \sim 700 \text{ mg} \cdot \text{min/L}$, under the same CT value, the disinfection efficiency of target microbe would be notably enhanced by increasing the number of baffles which would improve the hydraulic characteristics. So the results verified that the disinfection efficiency could be enhanced by improving the hydraulic characteristics of the clearwell.

Key words: clearwell; hydraulic characteristics; effective hydraulic retention time; disinfection; *Bacillus subtilis* spores

清水池是给水处理的重要单元, 对提高消毒效率、减少消毒副产物的产生、保证管网水质的安全稳定有十分重要的作用。研究表明, 清水池设计的改进是减少消毒副产物产生的重要手段之一^[1,2]。刘文君等^[3]提出了以提高 t_{10}/T 为目的的清水池设计原则, T 指清水池的理论水力停留时间, t_{10} 是有效水力停留时间, 指保证 90% 的消毒剂能达到水力停留时间, 也即测定在某时刻加的消毒剂中首先从清水池出来的 10% 的量的停留时间(在高峰供水时段), t_{10}/T 是衡量清水池水力效率的重要指标, t_{10}/T 越大, 清水池流态越接近活塞流, 流态越好。目前国内开展了通过优化清水池内部结构来提高水力效率的研究, 金俊伟等^[4]和杜志鹏等^[5]用 CFD 和示

踪试验的方法研究了清水池水力条件与 t_{10} 的关系, 结果表明, 通过改变清水池结构可有效提高有效水力停留时间 t_{10} ; 刘丽君等^[6]通过增加导流板数优化笔架山水厂示范工程清水池结构, 将 3 个清水池的 t_{10}/T 分别提高了 42%、21% 和 29%。以上研究表明, 可以通过增加清水池的导流板数来提高 t_{10}/T 值, 优化水力条件, 但对于清水池水力效率的增加是否会提高消毒效率的研究则鲜见报道。本试验用微生物试验研究不同的水力条件对消毒效率的影响,

收稿日期: 2008-10-10; 修订日期: 2008-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778096)

作者简介: 柳清(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水氯消毒技术优化, E-mail: qing-liu06@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wjliu@tsinghua.edu.cn

即研究 Ct_{10} 的改变对微生物灭活率的影响。

Chick 和 Watson 在文献[7]中提出的消毒公式 $\lg(N/N_0) = \alpha \cdot CT$ 中, N 是 T 时刻活的微生物的量, N_0 是消毒开始时的微生物量, α 是灭活系数(在一定温度下,特定消毒剂对特定微生物的灭活系数是常数), C 是余氯, T 是反应时间, CT 值指余氯与反应时间的乘积。对于静态烧杯试验,反应时间 T 就是指接触时间。但对于清水池,由于存在短路流, T 作为接触时间,不能以理论水力停留时间即不能以 $T = V/Q$ (V 为清水池体积, Q 为清水池流量)来计算,一般以 t_{10} 为接触时间来计算 CT 值^[2]。虽然文献[7]中的消毒公式要求对于清水池消毒 T 应当以 t_{10} 计,但 t_{10} 相对 T 在评价消毒效率时是否更加科学,目前并没有直接的微生物灭活试验证据。

因此本研究将在中试清水池中模拟氯消毒过程,通过改变清水池导流板数获得不同的水力条件,

即不同的有效水力停留时间 t_{10} ,考察清水池水力条件对消毒效率的影响,同时比较 CT 和 Ct_{10} 在评价灭活效果的不同,以完善 Chick-Watson 消毒公式在消毒效率方面的评价作用。

1 材料与方法

1.1 中试装置

在本研究中,以北京市第九水厂一期二系列清水池为原型,采用弗劳德相似原理设计清水池中试模型。该水厂实际清水池长宽均为 90 m,模型比例选为 60,即中试模型长宽均为 1.5 m,材料为有机玻璃。中试水池内设可调节导流板,以改变清水池结构;出水口设平板溢流堰控制水位为 80 cm;清水池外壁刷黑漆,顶部加盖遮光,清水池中试模型中导流板和进出口布置如图 1 所示。

1.2 试验方法

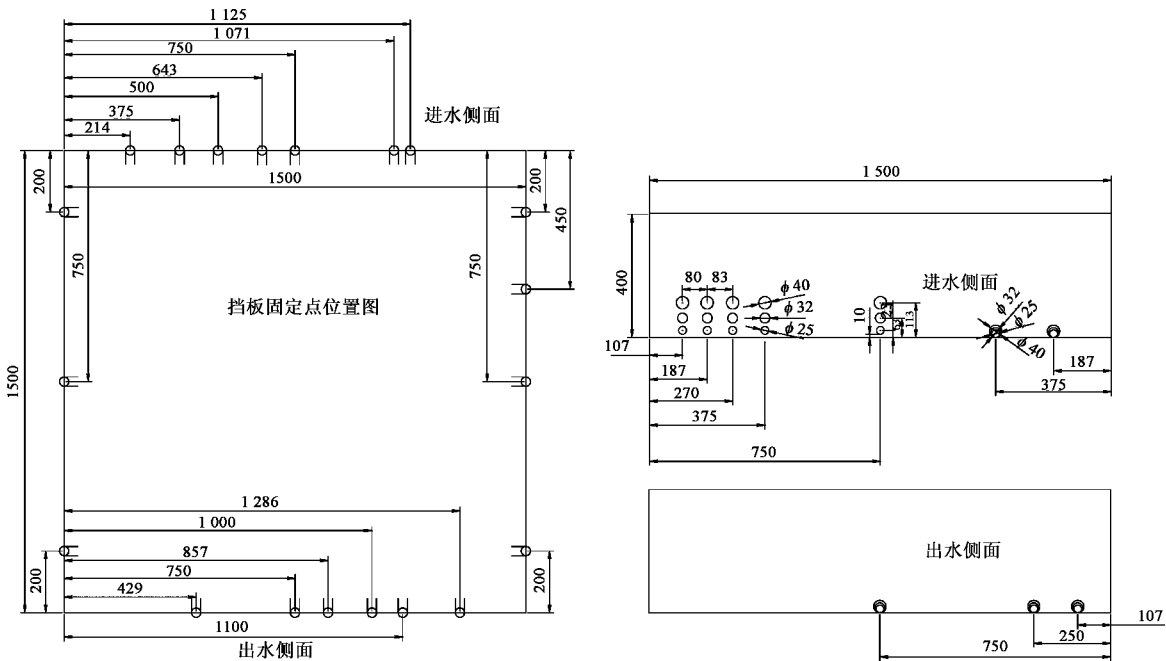


图 1 清水池中试模型布置示意
Fig.1 Layout diagram of the pilot clearwell

试验所用目标菌为枯草杆菌黑色变种芽孢(ATCC 5533),购于中国科学院微生物所,菌种的保存和菌悬液制备方法参照消毒技术规范(2002 年版).制备浓度约为 $10^7 \sim 10^8$ CFU/mL 的菌悬液保存于 4℃ 冰箱中,使用前用巴氏灭菌法杀灭细菌繁殖体,然后稀释至浓度为 $10^5 \sim 10^6$ CFU/mL 的细菌使用液。

氯消毒剂用次氯酸钠溶液($>5\%$)和无氯水配

制,浓度约为 50 g/L,现用现配,使用前用便携式哈希余氯仪测定其浓度。菌液和药液分别置于棕色细口瓶中,通过磁力搅拌器搅拌均匀。

中试清水池进水是经过低压紫外灯消毒(>40 mJ/cm²)的水厂炭滤池出水,其水质指标见表 1;通过转子流量计调节清水池进水流量,待清水池流态稳定(通常是 2 倍的水力停留时间)后,通过 LMI 电磁驱动隔膜计量泵调节消毒液和菌液流量,消毒液、菌

液和进水在静态混合器中混合后进入清水池，见图 2。

表 1 进水水质指标及测定方法

Table 1 Water quality of influent and determination methods

水质指标	变化范围	检测方法
余氯/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.01 ~ 0.03	HACH Chlorine Pocket Colonimeter™ II
水温/ $^{\circ}\text{C}$	3.3 ~ 17.6	水银温度计
pH	6.3 ~ 7.1	Thermo Orion Model410 pH 计
TOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.41 ~ 3.03	SHIMADZU TOC-V wp TOC 仪
$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.007 9 ~ 0.030 4	水杨酸法 ^[8]
细菌总数/ $\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$	0	普通营养琼脂倾注法 ^[8]

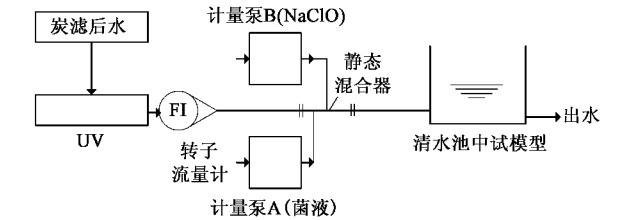


图 2 中试试验示意
Fig.2 Schematic diagram of pilot test

2 倍的水力停留时间后，从清水池进水口和出水口取样，加微过量的 10% 无菌 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液终止余氯，留作微生物检测。枯草杆菌黑色变种芽孢的检测采用普通营养琼脂倾注法。

1.3 消毒效率的评价

消毒效果依据清水池进出水水样中微生物的灭活率来计算：

灭活率 = $\lg(N_0/N)$
式中， N_0 为进水样中目标微生物个数； N 为在清水池反应一定时间后出水水样中剩余微生物个数。

清水池流量固定为 120 L/h（即固定理论水力停留时间为 90 min），加菌加氯流量固定为 0.67 L/h，改变进水口加氯量，获得不同的 CT 值（ C 指清水池出口余氯），检测相同导流板不同 CT 值以及 Ct_{10} 值下的消毒效果；改变导流板数，获得不同的 t_{10} 值，考察不同水力条件下清水池对枯草杆菌黑色变种芽孢的灭活率。

2 结果与分析

2.1 Ct_{10} 与 CT 对消毒效率的评价

杜志鹏等^[5]通过示踪试验确定本中试模型的不同导流板情况下的 t_{10}/T 值，见表 2。通过清水池流

量计算理论水力停留时间 T ，从而可求出不同导流板下的 t_{10} 。分别以不同导流板情况下的 CT 和 Ct_{10} 为横坐标，以枯草杆菌芽孢的 $\lg$ 灭活率为纵坐标做图，回归直线的斜率代表 NaClO 对枯草杆菌芽孢的灭活系数，见图 3 和图 4。

表 2 中试清水池不同导流板数目下的 t_{10}/T 值

Table 2 t_{10}/T value of pilot clearwell with different baffle numbers

导流板数	6	3	0
t_{10}/T	0.69	0.50	0.10

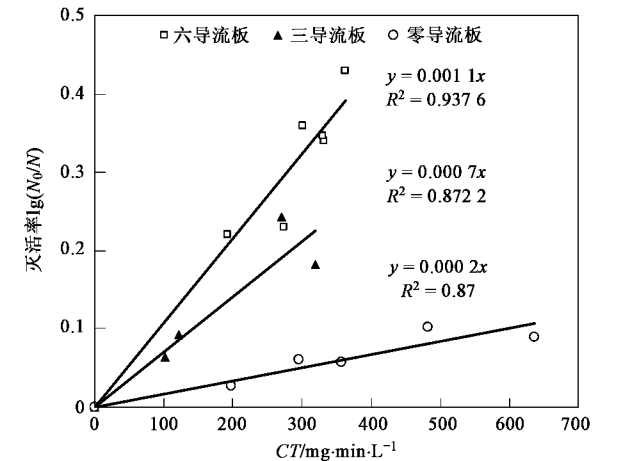


图 3 不同导流板数目下枯草杆菌黑色变种芽孢灭活率和 CT 值的关系
Fig.3 Relationship between CT value and the inactivation coefficients of *Bacillus subtilis* spores with different baffle numbers

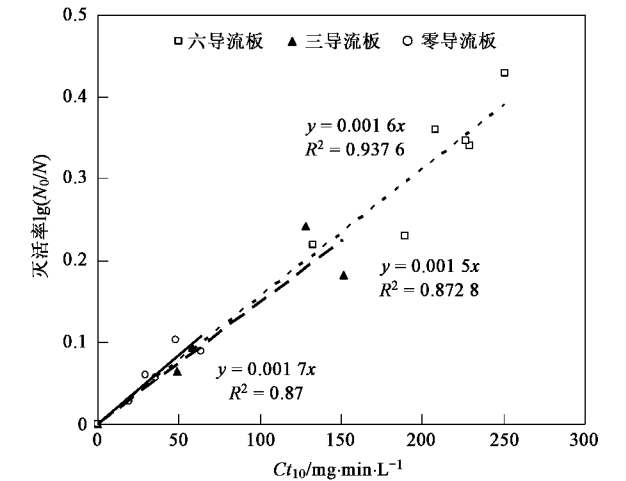


图 4 不同导流板数目下枯草杆菌黑色变种芽孢灭活率和 Ct_{10} 值的关系
Fig.4 Relationship between Ct_{10} value and the inactivation coefficients of *Bacillus subtilis* spores with different baffle numbers

从图 3 可看出以 CT 为横坐标时,3 种导流板条件下枯草杆菌黑色变种芽孢灭活率和 CT 值均呈较好的线性关系,但是回归直线斜率即灭活系数相差很大,六导流板、三导流板和零导流板条件下以 CT 值计算的 NaClO 对枯草杆菌黑色变种芽孢的灭活系数分别为 $0.001\ 1$ 、 $0.000\ 7$ 和 $0.000\ 2\ \text{L}/(\text{mg}\cdot\text{min})$. 而以 Ct_{10} 为横坐标时,如图 4 所示,六导流板、三导流板和零导流板 3 种条件下枯草杆菌黑色变种芽孢灭活回归直线斜率则非常接近,3 种导流板条件下以 Ct_{10} 计算的灭活系数分别为 $0.001\ 6$ 、 $0.001\ 5$ 和 $0.001\ 7\ \text{L}/(\text{mg}\cdot\text{min})$,平均值是 $0.001\ 6\ \text{L}/(\text{mg}\cdot\text{min})$.

如果清水池是一个完全推流式反应器,理论水力停留时间即 $T = V/Q$ 就是消毒剂与微生物真正的接触时间,因此不同数目导流板条件下,因为 T 相同,以 CT 值计算的微生物灭活系数也应该相同,但是本试验结果表明不同导流板条件下以 CT 值计算的 NaClO 对枯草杆菌灭活系数相差很大.可见,本中试清水池并不是一个完全推流式反应器,由于存在短路流, T 不能代表消毒剂与微生物真正的接触时间,不同数目导流板条件下, T 与实际接触时间的差别也不同,因此对于清水池以 CT 值来评价微生物灭活率会存在误差,不能以理论水力停留时间即 $T = V/Q$ 来计算,一般以 t_{10} 为接触时间来计算 CT 值^[3].本试验结果表明以 Ct_{10} 来计算微生物灭活率时,不同数目导流板条件下的灭活系数基本相同,可见以 Ct_{10} 来计算清水池的消毒效率是较为合理的.

张永吉等^[9]通过静态烧杯实验研究 NaClO 对枯草杆菌芽孢的灭活,在 CT 值为 $0 \sim 300\ \text{mg}\cdot\text{min}/\text{L}$ 范围内,测得灭活系数为 $0.001\ 8\ \text{L}/(\text{mg}\cdot\text{min})$. 在本试验中试条件下以 Ct_{10} 计算的 NaClO 对枯草杆菌芽孢的灭活系数为 $0.001\ 6\ \text{L}/(\text{mg}\cdot\text{min})$,与静态实验结果具有很好的一致性.

2.2 t_{10} 对消毒效率的影响

比较不同导流板情况下分别以 CT 和 Ct_{10} 为横坐标做出的菌种灭活直线,如图 3 和图 4,可以看出,同样的 T ,六导流板条件下清水池的 t_{10} 最大,与 T 最接近,2 条直线斜率最接近,然后是三导流板、零导流板.从图 3 中可以看出同样的 CT ,不同水力条件下的菌种灭活率顺序为六导流板 > 三导流板 > 零导流板;达到相同 $\lg$ 灭活率时,所需要的 CT 值为六导流板 < 三导流板 < 零导流板.选择一组试验数据,比较相近 CT 值不同导流板数条件时的菌种灭活率,见表 3.可见,在 CT 为 $100 \sim 700\ \text{mg}\cdot\text{min}/\text{L}$ 的范

围内,随导流板数增多,清水池内水力条件改善, t_{10}/T 提高,菌种灭活率也得到提高;即达到相同灭活率目标时,清水池导流板数越多,所需要的 CT 值越小,当 T 是定值时,所需要的 C 越小,因此可以减少清水池进水口的加氯量,从而可以减少消毒副产物的生成.

表 3 相近 CT 值不同导流板数目时的菌种灭活率
Table 3 Inactivation coefficients of *Bacillus subtilis* spores under similar CT value with different baffle numbers

参数	六导流板	三导流板	零导流板
t_{10}/T	0.69	0.50	0.10
$C^*1)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.35	3.37	3.10
$CT/\text{mg}\cdot\text{min}\cdot\text{L}^{-1}$	301.5	303.3	296.4
$Ct_{10}/\text{mg}\cdot\text{min}\cdot\text{L}^{-1}$	208.0	151.7	29.6
枯草杆菌芽孢 $\lg$ 灭活率	0.360	0.182	0.060

1) C^* 指 2 倍理论水力停留时间 T (即 180 min)后清水池出口处自由余氯浓度

3 结论

(1)本试验条件下,不同导流板条件下通过 Ct_{10} 计算出的 NaClO 对目标菌种的灭活系数基本相同,而通过 CT 计算出的目标菌种的灭活系数相差很大,证明以 Ct_{10} 作为清水池消毒效率的评价指标是合理的;在 Ct_{10} 为 $100 \sim 300\ \text{mg}\cdot\text{min}/\text{L}$ 的范围内,枯草杆菌黑色变种芽孢的灭活动力学符合 Chick-Waston 消毒公式,灭活率 $\lg(N_0/N)$ 与 Ct_{10} 有良好的线性关系,且不同导流板条件下通过 Ct_{10} 计算出的目标菌种的灭活系数基本相同,平均值为 $0.001\ 6\ \text{L}/(\text{mg}\cdot\text{min})$,与其他研究者的结果具有很好的一致性.

(2)清水池水力条件的改善可以提高消毒效率.当 CT 值固定时,随着清水池内导流板数增多,水力条件得到改善, t_{10} 增加,目标菌种的灭活率显著提高.达到相同的灭活率时,不同导流板情况下均需要相同的 Ct_{10} 值,但导流板数越多, t_{10} 与 T 越接近,因此所需的 CT 值越小,在进水流量和体积不变的情况下,清水池的理论水力停留时间 T 为定值,因此 CT 值的减小意味着可以减少消毒剂的投加量,这对于控制消毒副产物的生成是十分有利的.

致谢:本试验场所由北京市第九水厂提供,并得到国家自然科学基金项目(50778096)资助,谨致谢意.

参考文献:

- [1] Crozes G F, Hagstrom J P, Clark M M, *et al.* Improving Clearwell Design for CT Compliance[R]. AWWA Research Foundation and AWWA, 1997.
- [2] USEPA. Microbial and Disinfection Byproduct Rules Simultaneous Compliance Guidance Manual[R]. 1999.
- [3] 刘文君, 张金松, 刘丽君, 等. 清水池设计改进原理和应用[J]. 给水排水, 2004, **30**(5): 10-12.
- [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): 41-44.
- [5] 杜志鹏, 刘文君, 张素霞. 清水池有效水力停留时间的影响因素[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, **47**(12): 2139-2141.
- [6] 刘丽君, 焦中志, 刘文君, 等. 给水厂常规消毒工艺的优化技术与应用[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(1): 5-8.
- [7] James M. Water Treatment: Principles and Design[M]. New York, NY: Wiley Interscience. Montgomery Consulting Engineers, Inc. 1985.
- [8] GB 5749-2006, 生活饮用水标准检验方法[S].
- [9] 张永吉, 刘文君, 张琳. 氯对紫外线灭活枯草芽孢杆菌的协同作用[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 329-332.