



消毒剂余量与 AOC 对管壁生物膜生长控制的研究

鲁巍¹, 张晓健¹, 何文杰², 韩宏大²

(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: 通过实验室配水试验和小型动态试验的研究, 确定了控制管壁生物膜生长的消毒剂余量和 AOC 浓度。研究表明, 0.05mg/L 余氯量对管壁生物膜的生长繁殖无显著影响, 与不投加消毒剂时生物膜的稳态生物量无显著差异。AOC 浓度低于 150 μ g/L, 余氯量控制在 0.3~0.5mg/L 时, 生物膜稳态生物量低于 103CFU/cm², 可以实现有效控制。余氯量高于 1.0mg/L 时, 生物膜基本不生长。无消毒剂条件下, 即使保证较低 AOC 浓度, 膜细菌数量仍可达到 104CFU/cm² 量级, 无法实现有效控制。研究证明了生物膜的脱落是悬浮菌数量的主要影响因素, 膜脱落过程满足一级动力学。

关键词: 生物膜, 饮用水, 消毒, AOC

[2]给水管表面细菌附着生长形成生物膜, 消毒剂与管道材料、表面沉积物、腐蚀产物间发生氧化反应大量消耗, 降低了其对细菌的灭活作用, 导致细菌在管壁上仍可大量繁殖[1]。并且随着生物膜的生长, 生物膜不断脱落, 细菌不断进入水体, 重新引起饮用水的微生物风险[2]。因此, 管壁生物膜的生长是影响管网水中悬浮菌数量的重要因素。目前, 国外在管壁生物膜的研究领域已经进行了一定的研究, 而我国在相关领域的研究仅处于起步阶段, 仅有对实际管网爆管后所取管垢进行微生物种群分析的相关报道[3], 缺乏对管壁生物膜生长特性及控制对策的系统研究。本文研究的目的是评价水质条件、消毒剂浓度两个主要因素对管壁生物膜生长的影响, 并确定生物膜脱落与悬浮菌量间的量化关系。

1 试验材料和方法

1.1 悬浮菌数量测试方法

异养菌平板计数 (HPC): 国内均采用传统牛肉膏蛋白胨培养基, 国外多采用 R2A 培养基进行平板计数^[4]。后者的培养条件和营养成分更加适合细菌生长繁殖, 其计数结果较传统培养基高出约 1~2 个数量级, 因此本试验中均采用 R2A 培养基进行平板计数。

R2A^[5]培养基基本组成为: 酵母浸膏 0.5g, 蛋白胨 0.5g, 酸水解干酪素 0.5g, 葡萄糖 0.5g, 可溶性淀粉 0.5g, 丙酮酸钠 0.3g, K₂HPO₄ 0.3g, MgSO₄·7H₂O 0.05g, 琼脂 15g, pH 7.0~7.2, 溶于 1L 水。培养温度为 22℃, 培养时间 7 天。

1.2 生物膜剥离及定量的方法[6]

生物膜采用生物膜反应器进行培育, 经 8 天后, 取出生物膜载片进行测试。首先使用 2 根灭菌棉签先后向下擦拭载片挂膜面各 5 次, 擦拭完后将两根棉签一起放入盛有 10mL 缓冲溶液的试管中, 使用超声波清洗器清洗, 超声电功率 500w, 工作频率 40KHz。超声波作用 20 分钟左右后, 从试管中取出 100 μ L 水样稀释, 进行平板计数。

1.3 消毒剂浓度定量方法

试验采用提前配好的次氯酸钠溶液和氯胺溶液进行试验, 余氯量采用 DPD—FAS 滴定法标定有效氯, 测定随时间变化的氯胺消毒曲线时, 步骤和氯消毒相似^[7]。

2 试验结果与讨论

2.1 实际给水管网悬浮菌数量调查

从 2003 年 3 月开始至 2004 年 6 月从天津市芥园水厂配水管网不同取样点测试了共 78 个水样中的悬浮菌数量, 图 1 为悬浮菌数量的累积分布图。从图中可以看出, 芥园管网细菌总数分布在 10¹~10⁴量级, 水

样中仅 22% 可达到 $<500\text{CFU/mL}$ 的标准 (USEPA)，约 21% 水样中细菌总数甚至 $>104\text{CFU/mL}$ 。USEPA 规定了 $\text{HPC} < 500\text{CFU/mL}$ 的标准，其中有关 HPC 危害的定义为：HPC 不是评价健康风险的直接指标，仅仅是测量水体中细菌数量的一种方法，但是饮用水中 HPC 数量越低说明管网系统细菌生长的控制情况越好。从对芥园管网细菌总数的测量结果来看，细菌数量普遍偏高，管网水水质生物稳定性差。

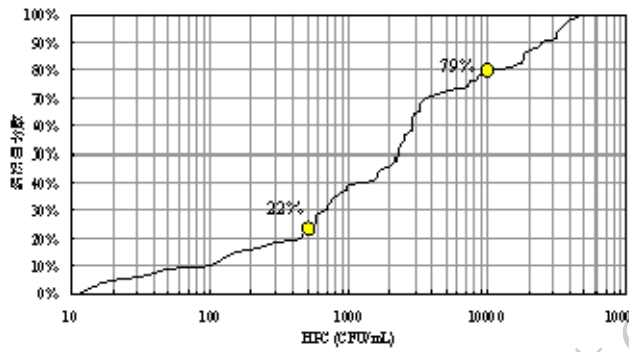


图 1 管网水中悬浮菌数量累积分布图

水厂出水消毒后，在给水管网中仍然保持相对较高的余氯量以抑制悬浮细菌的重新生长，但是由于胞外多聚物的形成使得生物膜微生物对外界不良环境的抗性明显强于游离态的同种微生物 (Wingender 发现氧化性消毒剂 Cl_2 ，可以通过与 EPS 反应而被消耗掉^[8])。因此，生物膜的生长繁殖可能是芥园管网细菌数量较高的重要原因。

2.2 余氯量和 AOC 含量对生物膜生长的影响

由于在实际管网中进行生物膜生长特性的研究存在取样困难，试验条件不可控等难点，因此生物膜部分主要利用 AR (Annular Reactor) 反应器模拟给水管道中的实际条件来培育生物膜。

图 2 为采用化合氯作为消毒剂时，不同余氯量和 AOC (Assimilable Organic Carbon) 浓度对于稳态生物膜生物量的影响。从图 2 中可以看出，AOC 和余氯量的双重控制可以有效降低生物膜的稳态生物量。0.05mg/L 的余氯量无法满足控制管壁生物膜生长的要求，与不投加消毒剂时的生物膜稳态生物量没有显著差异。随着余氯量的增加，稳态生物膜的生物量呈下降趋势。余氯量高于 1.0mg/L 时，几种 AOC 浓度下生物膜的生长都得到了抑制。随着 AOC 浓度的降低，稳态生物膜的生物量也呈下降趋势。当 AOC 浓度低于 $150\mu\text{g/L}$ ，余氯量控制在 0.3~0.5mg/L 时，生物膜稳态生物量基本低于 10^3CFU/cm^2 ，可以实现有效控制。

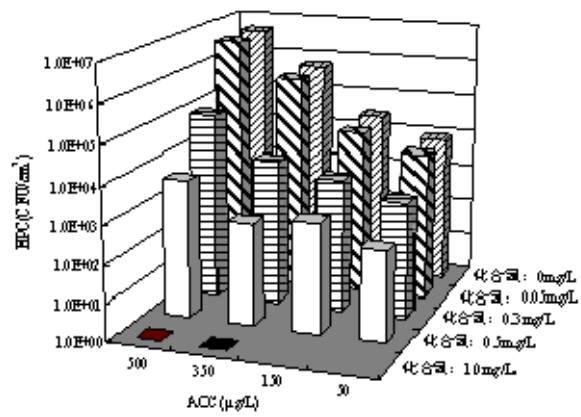


图 2 不同 AOC 浓度下化合氯余量对稳态生物膜生物量的影响

与化合氯消毒类似，从 0.05mg/L 的自由氯余量条件下生物膜稳态生物量与不投加消毒剂时的生物量无显著差异。随着余氯量的增加，稳态生物膜的生物量呈下降趋势。余氯量高于 1.0mg/L 时，几种 AOC 浓度下生物膜的生长都得到了抑制。随着 AOC 浓度的降低，稳态生物膜的生物量也呈下降趋势。当 AOC 浓度低于 150μg/L，余氯量控制在 0.3~0.5mg/L 时，生物膜稳态生物量基本低于 10³CFU/cm²，可以实现有效控制。

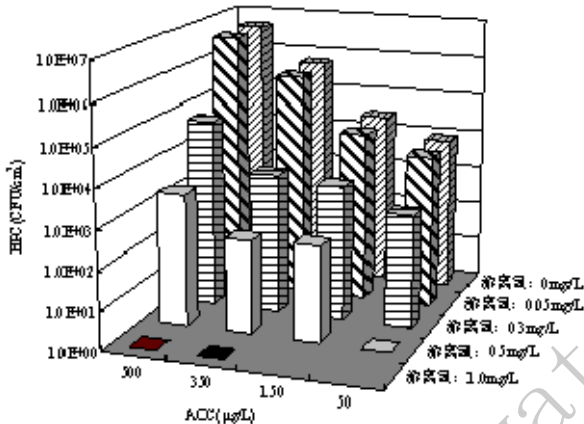


图 3 不同 AOC 浓度下游离氯余量对稳态生物膜生物量的影响

2.3 生物膜脱落与悬浮菌数量的关系

对反应器达到稳态后的细菌数量进行物料衡算可得下式：

$$\log (X_{fe}) =n\cdot\log (X_a)+\log (k_{bd}/(Q/A+k_{fa}\cdot R))$$

式中Xfe表示出水中的悬浮菌量（CFU/mL），Q表示反应器进水量（mL/h），V为反应器有效容积（mL），A表示反应器中载片有效附着面积（cm²），kfa表示悬浮菌附着速率常数，R表示反应器有效体积与生物膜有效附着面积的比值，kbd表示生物膜的脱落速率常数，Xa为生物膜生物量（CFU/cm²），n表示脱落过程为n级动力学过程。

图 4 为AR反应器出水悬浮菌数量和反应器中生物膜生物量的相关关系。从图中可以看出，稳态生物膜生物量和悬浮菌数量的对数值呈线性相关。结合上式可知生物膜的脱落符合一级动力学过程，即式中n=1。

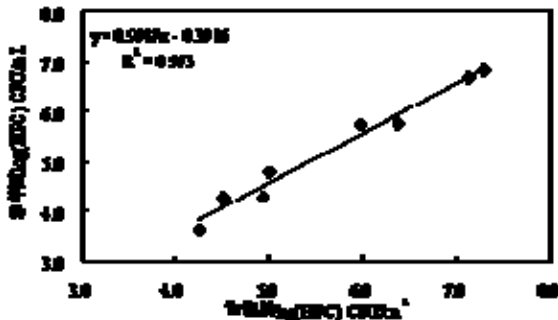


图 4 反应器稳态条件下生物膜生物量与出水悬浮菌量的关系

3 结论



通过实验室配水试验研究了管壁生物膜的生长特性及其生长控制条件，主要结论如下：

(1) 0.05mg/L 的余氯量对于管壁生物膜的生长繁殖无显著影响，与不投加消毒剂时生物膜的稳态生物量无显著差异。我国目前饮用水水质标准中规定的管网末梢余氯量 $<0.05\text{mg/L}$ 的标准要求可能无法满足控制管壁生物膜生长的要求。

(2) 在我国目前的饮用水水质条件下，将余氯量控制在 0.3mg/L 以上时，生物膜稳态生物量可基本在 103CFU/cm^2 水平以下，可以实现有效控制。

(3) 从生物膜生物量与悬浮菌数量间的线性关系可以推断，生物膜的脱落是影响悬浮菌数量的主要因素。

参考文献

1. Weidong Zhang, Francis A. DiGianol. Comparison of bacterial regrowth in distribution systems using free chlorine and chloramine: a statistical study of causative factors. Wat. Res., 2002, 36:1469-1482
2. Chenghwa Chu, et al. Effects of inorganic nutrients on the regrowth of heterotrophic bacteria in drinking water distribution systems. Journal of Environmental Management, 2005, 74: 255-263
3. 马从容. 蚌埠市饮用水的生物稳定性研究. 工业用水与废水, 2001, 32 (4) : 16-21
4. 俞毓馨等. 环境工程微生物检验手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 136-144
5. Reasoner D J and Gleidrich E E. A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water. Appl. Environ. Microbiol., 1985, 49: 1-7
6. 鲁巍, 王云等, BAR 反应器中生物膜分离及定量方法的研究, 中国给水排水, 2005, 21 (2) : 91~94
7. 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1989