

# 给水管壁生物膜特性与控制方法

周玲玲<sup>1</sup>, 张永吉<sup>2</sup>, 黄飞<sup>3</sup>, 李伟英<sup>2</sup>, 李圭白<sup>1</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. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 3. 宜宾学院化学化工系, 四川宜宾 644000)

**摘要** 对给水管网中管壁生物膜的形成, 影响管壁生物膜生长的因素及生物膜的结构等特性进行了阐述, 分析了管壁生物膜上的细菌对消毒剂具有较强耐受力的原因, 对控制生物膜形成的方法进行了总结, 并对今后的研究方向进行了展望。目前, 国内对管壁生物膜尚处于初步研究阶段, 还有很多相关课题需要深入研究。

**关键词** 给水管壁 生物膜 消毒剂

中图分类号: TU528 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2008)04-0005-04

## The Characteristics and Control Methods of Biofilm in Drinking Water Distribution System

ZHOU Ling-ling<sup>1</sup>, ZHANG Yong-ji<sup>2</sup>, HUANG Fei<sup>3</sup>, LI Wei-ying<sup>2</sup>, LI Gui-bai<sup>1</sup>

(1. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;  
2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
3. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Yibin University, Yibin 644000, China)

**Abstract** Formation mechanism of biofilm, factors influencing the growth of biofilm and its structure in drinking water distribution systems were reviewed in this paper. The reason that the bacteria in biofilm have relatively high resistance to disinfectants was analyzed, control methods of biofilm were summarized, and the progressive trend was pointed out. Biofilm study on pipe wall in distribution system is at the beginning in China, so it needs to be thoroughly investigated.

**Key words** pipe walls in distribution system biofilm disinfectant

给水厂通常投加一定剂量的消毒剂, 并在管网中保持一定的余氯量来控制细菌在管网中的再生长。然而一些研究表明, 管网中即使保持较高浓度的余氯, 到达用户端的水质还会出现细菌总数超标的问题。细菌在管网中的生长包括在水中悬浮生长和在管壁的附着生长两种形式。管壁表面的无机沉积物、管道腐蚀产物可以吸附微生物需要的营养物质, 管壁表面为细菌提供了相对营养丰富的生存环境, 因此, 相对于水中贫营养环境, 微生物在管壁的附着生长更占优势, 即配水系统中微生物主要是以附着在管壁上生长、最终形成生物膜的形式得以增殖<sup>[1]</sup>。

给水管壁生物膜会降低饮用水的微生物安全性, 如引起管壁结垢和腐蚀, 造成管网过水能力下降, 影响给水系统的运行和用户端水质。更重要的

是, 生物膜上一旦产生生物粘泥, 会为大型生物体和致病菌的出现、繁殖创造条件。生物膜由于老化、水流速度改变等一些原因造成的脱落会恶化水质, 增加水的色度和浊度, 使水中细菌总数上升, 威胁人们的身体健康, 一些水致传染疾病的发生就是由于管网中细菌的过度生长造成的<sup>[2]</sup>。

## 1 给水管壁生物膜形成的影响因素分析

给水管壁生物膜的形成速度、微生物的种类和密度会受温度、pH 值、消毒剂浓度、水力状况、可用的营养物质及营养物质类型的影响<sup>[3-6]</sup>。

### 1.1 温度

生物膜中微生物数量在不同季节里呈规律性变化, 如在温暖季节里微生物种类和数量增多, 而在冬季温度较低时微生物数量减少。温度对生物膜的影响表现在微生物的活性方面, Van 等的研究表明: 温度由 17℃ 降低到 7℃ 时, 生物膜的活性降低了 50%。温度不但直接影响微生物的生长, 还影响其它间接

[收稿日期] 2008-03-14

[基金项目] 十一五国家科技支撑计划项目(2006BAJ08B02, 2006BAJ08B06), 同济大学青年优秀人才培养行动(2007KJ016)

[作者简介] 周玲玲(1976-), 女, 哈尔滨工业大学在读博士研究生, 研究方向为给水处理技术。电话: 13651744120; E-mail: an-

控制微生物生长的因素。这些因素包括消毒剂的消毒效率、残余消毒剂的损耗、管材腐蚀速度、管网水力条件等<sup>[7-8]</sup>,如温度较高时,消毒剂的杀菌效率会提高,但消毒剂的衰减速率也会提高,并且管网的腐蚀速率也会增加,为细菌的繁殖提供了条件。

## 1.2 pH 值

当环境的 pH 值超过微生物生理活性的范围,会对微生物的生长速率产生影响。依据不同种类的微生物,其最适的 pH 值范围在 6.0~7.6。对于管网中的异养菌,最适的 pH 值为 7.0。pH 值对微生物的抑制作用主要是降低酶的活性。饮用水管网系统的 pH 值通常保持在一个较窄的范围(6.0~8.5),当 pH 值高至 9.4 时会对大肠杆菌造成损伤<sup>[2]</sup>。

## 1.3 消毒剂种类及余氯

研究表明,在较高消毒剂存在的条件下,即使细菌和有机物的含量增加,生物膜中的微生物数量也较低,而当氯被硫代硫酸钠中和后生物膜在几天后就开始形成,15 d 后可培养的微生物的浓度稳定在  $(1\sim 10)\times 10^6$  CFU/cm<sup>2</sup>,可见消毒剂对生物膜的控制作用是非常显著的。目前,水厂采用的消毒剂主要是自由氯和化合氯,二者消毒机理不同。自由氯主要是与细菌的酶系统反应而破坏细菌,而化合氯消毒的机理是破坏细菌膜的完整性,因而影响膜的渗透性和细菌的呼吸。从管网水中余氯的维持时间、生物膜控制和消毒副产物的产生考虑,化合氯优于自由氯<sup>[9-10]</sup>。

## 1.4 营养物浓度的影响

近十几年来国外的研究表明:饮用水中存在的有机营养是促进细菌在管道中生长的主要因素。即使保持较高的余氯量,只要水中有足够的有机营养物,细菌仍能在配水管网中生长。目前国外已在给水管网中检测出几十种细菌,除少量铁细菌和硫细菌外,主要是以有机物为营养基质的异养菌。

目前的研究主要以生物可同化有机碳 AOC (Assimilable Organic Carbon) 作为饮用水生物稳定性的评价指标,它是有机物中最易被细菌吸收、直接同化成细菌体的部分,是生物可降解有机物的一部分。部分学者也以生物可降解有机碳 BDOC (Biodegradable Dissolved Organic Carbon) 作为饮用水生物稳定性的评价指标,它是水中细菌和其它微生物新陈代谢物质和能量的来源,包括同化作用和异化作用的消耗。

Van Der Kooij 比较了三个实际的给水系统,发现 AOC 在管网中逐渐下降,AOC 下降最多时细菌

计数也最多<sup>[11]</sup>。当 AOC 和 BDOC 含量低到一定程度,将影响细菌的生长繁殖。在进一步监测了 20 个水厂配水管网中 AOC 的浓度和异养菌、大肠杆菌的密度关系后, Van Der Kooij 发现当 AOC < 10 μg 乙酸碳/L 时异养细菌几乎不能生长<sup>[11]</sup>,此时饮用水生物稳定性很好。Lechevallier 发现当 AOC < 54 μg 乙酸碳/L 时大肠杆菌不能生长,其后 Lechevallier 提出 AOC 浓度应限制在 AOC < 50 μg 乙酸碳/L 以保证水质生物稳定<sup>[2]</sup>。1996 年 Lechevallier 报道:对北美 31 个水厂配水管网中 AOC 的浓度和异养菌、大肠杆菌的密度监测表明当 AOC 浓度低于 100 μg 乙酸碳/L 时,给水管网中大肠菌群过量的问题就可以得到控制<sup>[12]</sup>。Joret 研究认为 BDOC < 0.1 mg/L 时大肠杆菌不能在水中生长<sup>[13]</sup>。

在其它营养元素的研究方面, Minna M. Keinanen 等研究了无机磷元素对微生物群落结构的影响,认为群落结构的变化可能是由于微生物中磷脂酸和脂多糖结构的变化引起的。Lehtola 等对外加磷投加量较大的情况下,生物膜中生物量有明显增加<sup>[14]</sup>。

## 2 给水管壁生物膜的结构

Gjaltema 等通过生物膜培养反应器(BAR)对生物膜进行观察发现,聚碳酸酯挂片上仅 3 d 就附着了细菌和菌落。在生物膜的发展初期,沿着水流方向,挂片上生物膜呈梯度分布,挂片上部生物膜越来越厚,下部越来越薄<sup>[15]</sup>。当生物膜达到稳定状态,形成了平行的凸起和凹陷的三维立体结构,其中广泛地分布着单个的细菌和菌落。生物膜并不是光滑和均匀的,而是由各种各样的结构形式呈现,包括片状、丝状、彗星状的平行线、螺纹状菌落。

李爽等的研究表明,管段服务年限越长,内壁腐蚀越严重管段的生物膜活菌数越多,金属管段比石棉管段的生物膜活菌数要高。生物膜是由适于低营养和高浓度消毒剂条件下的微生物群落组成,这些生物膜的特性变化广泛,由稀疏的附着于管壁表面的数微米的胞外多聚物和微生物细胞稠密地交织到一起形成的<sup>[16]</sup>。内壁扫描电镜结果显示,镀锌钢管的管垢有明显的孔洞和裂缝,PVC 管则比较均匀一致,管道内壁可明显观察到微生物的存在,在沉积物中大约有  $8\times 10^6$  CFU/g 的细菌数,管网水中生物膜活细菌进入水中的方式主要是成块脱落<sup>[17-18]</sup>。

不同管材的管壁上生物膜培养计数发现结果差异非常大。Nagy 和 Olson 等报道,在不同的管材异养菌浓度变化从  $5\times 10^4$  CFU/cm<sup>2</sup> 到  $10\times 10^4$  CFU/cm<sup>2</sup>。

即使在自由氯浓度 1~2 mg/L, 异养菌的浓度也能达到  $2 \times 10^4$  CFU/cm<sup>2</sup>。LeChevallier 等检测了四个州的配水管网及研究了四种管材的生物膜上异养菌的分布, 其浓度从  $0.2 \times 10^7$  到  $10 \times 10^7$  CFU/cm<sup>2</sup>, 通常是管段服务时间较长异养菌越多, 因此也说明了在配水管网中细菌的再生长<sup>[19]</sup>。

### 3 生物膜中的细菌对消毒剂的抗性

单个生物体的抗性与其生长条件、胞外分泌物及其形成的荚膜有关。而群集的微生物或其生物膜具有更强的抗余氯性, 随着生物膜龄增加, 抗性也增加。其原因很可能与生物膜的表面性质有关, 生物膜对其表面水流具有粘滞性, 可有效地浓集水流中的有机物和浊度物质, 相对减轻了余氯对生物膜表面生物体的伤害; 另一方面, 表面生物体具有生态位优势, 生理活性较强, 再加上长期的贫营养条件, 因而抗自由余氯的毒性较强。一氯胺与胞外多糖不反应, 杀菌力受微生物聚集和生物膜龄的影响很小, 用于管网水消毒效果比自由余氯好, 但其杀菌效率较低。

细菌吸附于一定的表面对氯及氯胺具有更强的抵抗力。颗粒活性炭、铜、铅、低碳钢和玻璃挂片生物膜上的细菌, 在 pH 值 7.0 对氯的抵抗力是悬浮细菌的 150 到 3 000 倍以上。Lechevallier 等研究表明, 活性炭(GAC)表面的原生异养菌与 2.0 mg/L 的氯接触 1 h, 百分之百的存活, 在颗粒物的裂缝中的细菌, 表面被细胞外的粘液层包裹着, 调查者提出它们可能从没与氯直接接触过。而且, GAC 本身消耗一定的氯。附着在 GAC 上的致病菌如伤寒沙门氏菌、耶尔森氏菌、志贺氏菌, 当与 2.0 mg/L 的自由氯接触 1 h 后, 细菌的灭活率仅为 0.14~0.50log, 40%~91% 的细菌受到损伤<sup>[20]</sup>。

另外, 生物膜上的细菌对一氯胺的抵抗力是悬浮细菌的 2~100 倍。对生物膜上细菌的灭活效率的降低, 可能是由于氯与生物膜组成成分发生化学反应, 减少了氯穿透生物膜, 而不与细菌本身及管壁材料反应。在这种情况下, 氯传输的速率成为大量的消毒剂到细菌表面的限制步骤<sup>[21]</sup>。扩散到生物膜的消毒剂分子在水中减少到 50%~80%。另一方面, 氯胺与含硫的氨基酸具有特定的反应, 这也是一氯胺灭活附着细菌效果较好的原因。在生物膜表面大量的胞外多聚物(EPS)为细菌提供保护, 然而 EPS 并没有被发现克雷伯氏杆菌对氯及氯胺有任何的抵抗作用<sup>[22]</sup>。但是, 值得指出的是, EPS 以多种化学形式存在, 许多 EPS 对细菌具有保护性, 生物膜龄及附

着时间同样增加了其对氯的耐受性, 也许是由于较老的生物膜存在更多的 EPS<sup>[23]</sup>。

## 4 控制生物膜在管网中生长的措施

### 4.1 去除可生物降解有机物

研究管壁生物膜生长特性的目的是为了寻找有效控制生物膜生长的条件和方法。营养水平是影响生物膜形成的一个重要因素, 但是管网系统的细菌不会由于营养水平的限制而停止再生长<sup>[2]</sup>。尽管 BDOC 对生物膜的作用很小, 但仍是生物膜生长的关键因素。而且, 减少有机物的水平也减少了氯的消耗, 增加消毒剂的稳定性, 减少氯在管网系统中的衰减。

Van der Kooij 等在玻璃反应器中对低 AOC 浓度的饮用水和外加碳源的饮用水对生物膜的形成影响进行了研究, 得出在低浓度基质条件下 BFR (Biofilm Formation Rate) 远远小于外加碳源的情况<sup>[11]</sup>。J.P. Chandy 等研究了基质浓度对生物膜形成的影响以及生物膜形成后对消毒剂余量的影响, 发现悉尼饮用水中碳源是生物膜生长的限制因素, 生物膜的形成加剧了化合氯的衰减, 化合氯存在的条件下生物膜仍然可以生长。而在低基质条件下, 加氯消毒, 则没有观测到生物膜的生长<sup>[10]</sup>。

水厂提高净化处理构筑物的运行效率, 去除细菌生长所需的营养基质, 可以为控制管网细菌生长打下了良好基础。另外, 管网加强管理、定期清洗、防止管道腐蚀与结垢, 能够有效地阻止生物膜的形成。李爽的研究表明, 管材对于内壁生物膜的发育速度影响很大, 当生物膜发育日趋成熟时则管材的影响作用减小, 定期更新管段可有效阻止生物膜的发育。AOC 和 BDOC 代表的是细菌容易利用分解的有机物, 生物处理技术是有效的单元处理工艺, 生物处理能直接降解小分子量亲水性的有机物, 利用胞外酶分解大分子量有机物, 并能降低胶粒的 Zeta 电位, 使胶粒更容易脱稳<sup>[24]</sup>。当前水源普遍受到污染, 单靠一种工艺并不具有制备生物稳定水的能力, 采用预处理、常规处理、深度处理相结合的组合工艺将是获得生物稳定性出水的有效途径。

### 4.2 磷作为控制生物膜生长的限制因子

近年研究表明, 磷和碳一样, 也是微生物生长的限制因子之一, 也可以作为控制管壁生物膜形成的一个重要方法, 而且在分析检测和水处理工艺的处理效果上与 AOC 相比, 更具实用价值, 但磷并不能完全取代 AOC 这一传统的控制饮用水生物稳定性的指标。已有研究指出, 在 AOC 浓度低于 10 μg 乙

酸碳/L时,仍可从水中分离出大肠杆菌,总磷含量低于 $2\mu\text{g/L}$ 时,仍能够维持微生物大量繁殖。因此,将磷与AOC共同作为饮用水生物稳定性的控制指标,在实际生产工艺中同时控制磷和AOC的含量,或者针对某些水质特性重点采用其中一种控制指标,对于抑制生物膜形成可能取得理想的效果<sup>[25]</sup>。

## 5 结语与展望

给水管壁生物膜会降低饮用水的微生物安全性,国内对给水管网内壁生物膜的研究尚处于初步探索阶段,还须从以下方面做深入研究。

(1)AOC与管壁生物膜中细菌的生长有着某种关系,目前只是对一些实际给水管网进行了调查工作,而对于有消毒剂存在下管壁细菌生长动力学及AOC与管壁生物膜中细菌的相互关系方面还需进一步研究。

(2)自然界中90%以上的细菌是不能使用人工方法培养出来的,尝试采用分子生物学的方法,例如聚合酶链式反应(PCR),凝胶电泳、测序反应获得DNA组成,分析哪些是致病菌、条件致病菌及优势菌种;应用荧光原位杂交(FISH)与激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)联用,对给水管壁的生物膜群落结构进行考察,通过微生物染色体的染色,不仅得到不同微生物、不同种群之间的演化关系,而且还可得到有关微生物代谢和遗传方向的信息。

### 参考文献

[1] Lechevallier M W, Shawn E, Kaplan L A, et al. Development of a rapid assimilable organic carbon method for water [J]. Applied Environmental Microbiology, 1993, 59(5):1526-1531.

[2] Lechevallier M W, Babcock T M, Lee R G. Examination and characterization of distribution system biofilm[J]. Applied Environmental Microbiology, 1987, 53(27):2714-2724.

[3] Duddridge J E. The effect of surface shear stress on the attachment of pseudomonas fluorescens to stainless steel under defined flow conditions[J]. Biotech and Bioeng, 1982, 24: 153-164.

[4] Van der Kooij, Vrouwenvelder H S, Veenendaal H R. Kinetic aspects of biofilm formation on surface exposed to drinking water [J]. Water Science and Technology, 1995, 32: 61-65.

[5] Phillip W. Butterfield, Anne K. Camper, Brian D. Ellis, et al. Chlorination of model drinking water biofilm: implications for growth and organic carbon removal[J]. Water Research, 2002,36(17):4391-4405.

[6] Minna M. Keinanen, Leena K. Korhonen, Markku J. Lehtola, et al. The microbial community structure of drinking water biofilm can be affected by phosphorus availability[J]. Applied Environmental Microbiology, 2002, 68 (1): 434-439.

[7] Lechevallier M W. Comprehensive assessment: bacterial regrowth in drinking water[M]. AWWA Research Foundation, 1989.

[8] Hao X, Heijnen J J, Van L M. Model-based evaluation of temperature and inflow variations on a partial nitrification - an ammonia biofilmprocess[J]. Water Research, 2002, 36(19): 4 839-4 849.

[9] 鲁巍. 给水管网细菌生长特性及其控制的研究[D]. 北京:清华大学环境科学与工程系,2005.

[10] Chandy J P, Angles M L. Determination of nutrients limiting biofilm formation and the subsequent impact on disinfection decay[J]. Water Research, 2001, 35 (11): 2677-2682.

[11] Van Der Kooij. Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth[J]. Journal AWWA, 1992, 84(2): 57-65.

[12] Lechevallier M W, Welch N J, Smith D B. Full scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water[J]. Applied Environmental Microbiology, 1996,62 (7): 2201-2211.

[13] Joret J C, Levi Y, Volk C. Biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) content of drinking water and potential regrowth of bacterial[J]. Water Science and Technology, 1991, 24 (2):95-101.

[14] Lehtola M J, Miettinen I T, Martikainen P J. Biofilm formation in drinking water affected by low concentration of phosphorus [J]. Canadian journal of Microbiology, 2002, 48(6): 494-499.

[15] Gjaltema A. Heterogeneity of biofilms in rotating annular reactors: occurrence, structure, and consequences[J]. Biotechnology Bioeng, 1994, 44:194-204.

[16] 李爽,张晓健. 给水管壁生物膜的生长发育及其影响因素[J]. 中国给水排水,2003, 19(13):49-52.

[17] Stewart P S, Peyton B M, Drury W J, et al. Quantitative observations of heterogeneities in pseudomonas aeruginosa biofilms [J]. Applied Environmental Microbiology, 1993, 59 :327-329.

[18] Tsai Y P, Pai T Y, Qiu J M, et al. The Impacts of the AOC concentration on biofilm formation under higher shear force condition[J]. Journal of Biotechnology, 2004, 111: 155-167.

[19] Nagy L A, Olson B H. Occurrence and significance of bacterial, fungi and yeasts associated with distribution pipe surfaces [M]. Proc. AWWA-WQTC, Houston, Tx. 1985.

[20] Lechevallier M W, Hassenauer T S, Camper A. K, et al. Disinfection of bacterial attached to granular activated carbon[J]. Applied Environmental Microbiology, 1984. 48(5): 918-923.

[21] Lechevallier M W, Cawthon C D, Lee R G. Factors promoting survival of bacterial in chlorinated water supplies [J]. Applied Environmental Microbiology, 1988a, 54(3): 649-654.

[22] Lechevallier M W, Schulz W, Lee R G, et al. Bacterial nutrients in drinking water[J]. Applied Environmental Microbiology, 1991, 57(3):857-862.

[23] Lechevallier M W, Cawthon C D, Lee R G. Inactivation of biofilm bacterial[J]. Applied Environmental Microbiology, 1988b, 54(10): 2492-2499.

[24] 方华,吕锡武,乐林生,等. 饮用水生物稳定性的研究进展与述评[J]. 净水技术,2004,23(5):15-18.

[25] 杨艳玲,李星,李圭白,等. 饮用水生物稳定性控制指标探讨[J]. 给水排水,2005,31(2):12-16.