

# 给水系统管壁生物膜的形成及控制措施

刘挺 许萍 汪慧贞 张雅君

(北京建筑工程学院,北京 100044)

**摘要** 讨论供水系统中生物膜对饮用水水质的影响,包括生物膜构成,影响形成的因素等。生物膜形成的主要影响因素,包括消毒剂的种类和残留浓度,细菌对于消毒剂的抗药性,管道材质及温度等。探讨了生物膜中细菌的监测方法,以及对于给水系统中生物膜问题的管理及控制措施。

**关键词** 给水管网 生物膜 微生物

## 0 前言

给水系统中病原菌的出现有两个原因:首先是外界影响。细菌可通过很多方式从外界进入给水管网,比如露天水库,管道的裂隙。其次是细菌的再生长、繁殖以及生物膜的形成。由于给水系统属于贫营养生长环境,细菌在管壁的附着生长多于悬浮生长,即会形成生物膜。它是微生物、微生物分泌物和微生物碎屑以及被吸附的有机物的复合体<sup>[1]</sup>。一些调查显示给水系统中生物膜中微生物的增加会导致饮用水臭味和色度的恶化,加速管道中的腐蚀现象<sup>[2]</sup>。

给水系统中与水接触的生物膜是水中悬浮细菌的主要来源。每检测到一个悬浮细菌意味着会有将近1 000个固着微生物在生物膜上,生物膜能容纳了各种各样的微生物<sup>[3]</sup>。最让人担忧的结果是出现致病菌和机会致病菌,比如假单胞菌、弯曲杆菌、克雷白石杆菌、气单胞菌、沙门氏菌等<sup>[4]</sup>。

## 1 给水管网中生物膜的生长及构成

微生物在给水系统中数量的增加可以用“再生长”、“繁殖”、“突破”描述。再生长是指给水处理过程中细菌受到损伤后,开始恢复增长的过程。生物稳定性可以用来表示给水中微生物生长的潜力,如果生物不稳定会造成配水管网中异养细菌等微生物的再生长<sup>[5]</sup>。繁殖是指微生物在给水系统中数量的增加。突破是指活性很强细菌,经过消毒过程后在给水系统中数量的增加。

附着是微生物聚集生长的第一步。生物膜生长是微生物成功粘附的结果,随之而来的是壁面表层微生物的增长。一定条件下,生物膜的生长最初是通过有机物在金属表面的聚集,之后则是细菌的繁殖。

生物膜内微生物产生并排出的有机高分子聚合物,称之为胞外聚合物(EPS)。EPS的化学结构随水体有机物的不同而不同,同时也取决于环境条件。由于边界层及胞外分泌物的影响,生物膜中微生物很少受到化学消毒剂的影响。管道内表面和水体内悬浮颗粒物会很大程度上提高微生物的生存和再生潜能<sup>[6]</sup>。

生物膜有时是连续均匀分布的,但有时是斑驳的。随着粘泥层厚度增加,生物膜内环境的改变会使细菌活性改变。给水系统中的生物膜是很薄的,最大可能就几百微米厚。另外,生物膜通常含有来自于外界的有机或无机的碎片。无机颗粒通常来自于淤泥、沉积物、无机盐腐蚀产物的沉淀<sup>[7]</sup>。

## 2 给水系统生物膜结构的影响因素

给水处理过程中存活下来的少量细菌,或者是已经存在于给水处理设施中的细菌,可能会在给水系统适宜条件下倍增。影响其生长率的条件因素包括配水系统中消毒剂残留浓度,微生物的抗药性,处理后饮用水中可降解化合物的种类和浓度,系统中使用的管道材料种类和水温等。

### 2.1 消毒剂

使用适宜浓度的杀菌剂能有效去除微生物,但也可能会促进可降解有机物的形成,为微生物提供能量来源,并促进给水系统中生物膜的形成<sup>[8]</sup>。氯

国家重大科技专项子课题(2009ZX07314-009-04);北京市组织部项目(20081D0501700203)。

化处理后细菌数量会快速下降,但是随着给水系统中余氯浓度的下降同时发生细菌再生长现象。众所周知,氯可以被水中噬菌体和输水管壁消耗。在水生噬菌体作用下,氯通常与氨、铁、有机化合物反应而被消耗掉,其消耗的速度依赖于管道的材料和水力条件(世代时间、直径、流速等)<sup>[9]</sup>。

臭氧可能会与原水中有机物质反应形成营养物质,使配水系统中出现再生现象,促进管道内壁上生物膜的生长<sup>[10]</sup>。惰性、持久性的杀菌剂,比如氯胺,在给水管系统中能维持一个很高的残余量,更有效地破坏生物膜,比起自由氯更容易控制生物膜。氯胺在小试过程中,能使生物膜的增长受到限制<sup>[11]</sup>。氯胺和过氧化氢残留浓度可维持很长一段时间,这两种杀菌剂在控制生物膜的增长方面比起任何一种其他消毒剂(氯、臭氧、紫外线)更有效<sup>[12]</sup>。

## 2.2 细菌的抗药性

即使给水系统中存在一定浓度的消毒剂,一些细菌因对这些化合物存在着抗药性可以存活并增长,生物膜中微生物比浮游微生物更不易受消毒剂的影响<sup>[13]</sup>。营养物的限制或消耗影响到细菌和细胞膜很多功能,其中就包括抗药性<sup>[14]</sup>。当营养物质受到限制后,很多细菌对消毒剂的抗药性降低。同时,碳源种类可能会影响到细菌生理特性。Al-Hiti and Gilbert 发现当柠檬酸钠替代甘油作为唯一碳源时,假单胞菌需要更多的磷酸盐<sup>[15]</sup>。

氯被广泛认为是杀死饮用水中大肠菌的重要手段之一。即使水中有足够消毒剂时,细菌在氯化作用后会依旧存活。这表明维持一定量的余氯并不能完全阻止细菌的出现。

## 2.3 生物可降解化合物的种类和浓度

给水系统中微生物的繁殖是通过利用可降解化合物,其存在于处理过的饮用水中或者来自于与饮用水接触反应的物质。化合物可以被微生物分别利用为能量、碳源、氢受体。异养微生物是给水系统中细菌的主要部分。这些生物使用有机碳化合物作为碳源,大多数把氧用做氢的受体。大约有 50% 可吸收有机碳被转化为 CO<sub>2</sub>(异化作用)来满足细胞的需要,50% 用来作为新的细胞材料,化合物中的 C、N、P 需求比为 100 : 10 : 1<sup>[16]</sup>。通常,氮源化合物的浓度为每升几百微克至几毫克(主要以硝酸盐形式),

而磷酸盐的浓度为每升几微克至几百微克<sup>[17]</sup>。

总有机碳(TOC)并不能很好指示细菌的再生长,因为有机营养物质与 TOC 比值并不恒定<sup>[18]</sup>。在大多数环境中,仅有一部分可溶有机碳能被微生物利用,其他的主要由难溶有机化合物组成,通常称为“腐殖质”,对细菌生长不起作用。生物可降解有机物可被分为两个单独部分:BDOC 和 AOC(可同化有机碳)。BDOC 是溶解有机碳(DOC)一部分,其可以在几天至几个月时间内被细菌新陈代谢利用<sup>[19]</sup>。水中出现的生物降解有机碳和饮用水来源决定了细菌再生长程度。来自湖泊和水库中的水比地表水含有更高浓度的 DOC。处理后饮用水中包含 DOC 的浓度低于 1 mg/L,不容易发生再生现象<sup>[20]</sup>。如果想要控制细菌的生长又不依赖于消毒剂投加量的增加,降低饮用水中可生物降解有机物含量是一个重要的途径。

AOC 作为生物可降解有机碳的一部分,可以转化为新的细胞物质(同化作用)。可被同化为有机碳化合物的浓度通常只是 DOC 浓度的一部分,尤其是当水已经进行很长时间生物作用过程后。Van der Kooij 把水中 AOC 浓度不高于 10 mg/L 醋酸中含有的碳作为可接受的浓度<sup>[21]</sup>。在这样低浓度情况下,饮用水中异养菌不会繁殖。Lechevallie 称 AOC 浓度应限制在 AOC < 50 μg 乙酸碳/L 以保证水质生物稳定<sup>[22]</sup>。又因为 AOC 与异养菌生长潜力有较好的相关性,大部分研究者将其作为评价管网水中细菌生长潜力的首要指标<sup>[23]</sup>。

## 2.4 管道材料

用于输水的管道材料通常可以被分为三类,水泥、金属和塑料。给水管线建设材料与水质有着直接联系。如果管道材料能够提供细菌生长足够的营养物质,那么管道材料内表面很容易形成生物膜形式,尤其是未做内防腐的金属管道<sup>[24]</sup>。在管道使用之前,应检测鉴定管道材料对水质影响,保证管道材料不会使水质恶化,不会产生出难以接受的臭味或气味,释放出化学物质或加速微生物的生长。壁面的疏水性或亲水性也会影响水生细菌在壁面的粘附。给水系统中大多数管壁包含细菌密度高达 10<sup>9</sup> 个/cm<sup>2</sup><sup>[25]</sup>。

从 20 世纪 50 年代起,人工合成管应用于饮用

水输配系统。PE 和 PB 被用作管道材料,因为有很多优良特性,如抗药性和耐腐蚀性,不导电,价格低廉,柔韧性好和易操作、储存和安装,这些管道材料得到广泛认可和应用。尽管它们有很多优势,但依然可能会在饮用水中形成生物膜。目前新的塑料管道材料,比如聚氯乙烯和中密度聚乙烯已经在给水系统中代替老的铸铁管<sup>[26]</sup>。

## 2.5 温度

细菌能生长和存活于极宽范围温度内。比如,夏季要比冬天有更多的细菌种类。但生物膜生长存在着一个最适温度,温度降低会抑制生物膜活性,温度过高对生物膜也有抑制作用。温度不但直接影响微生物的生长,还间接影响其他控制微生物生长的因素如消毒剂的消毒效率、残余消毒剂的损耗、管材腐蚀速度、管网水力条件等<sup>[27,28]</sup>。

## 3 输水系统中生物膜细菌的监测、健康影响和控制

### 3.1 监测分析技术

一系列的非破坏性现场定量监测生物膜技术已出现并得到应用。包括使用荧光计在线监测生物膜生长,以及一些电化学监测技术如阻抗光谱和石英晶体微天平法等。微生物群落可以被看作是基因组 DNA 的混合物,因此以微生物基因组 DNA 的序列信息为依据,通过分析环境样品中 DNA 分子的种类和数量来反映微生物的组成和群落结构<sup>[29]</sup>。另外,单链构象多态性以环境基因组信息为基础,以核糖体小亚基 RNA 基因为对象,从而实现分析群落动态的目的<sup>[30]</sup>。

目前对微生物进行显微观察通常采用扫描电镜(SEM)。而原子力显微镜(AFM)能以高分辨率镜检生物膜。激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)是采用激光作为光源,并利用计算机对所镜检的对象进行数字图像处理的一套镜检、分析和输出系统<sup>[31]</sup>。

### 3.2 生物膜对于公共健康的重要性

饮用水中微生物可以被分为四类:细菌、病毒、原生动、真菌。生物膜是细菌和其他微生物相互作用的点。大量不同种类异养菌被检测出来,其中假单胞菌、柄细菌、克雷柏氏杆、产碱杆菌等都有出现<sup>[32]</sup>。尽管没有单一的培养基、温度、培养时间能保障所有水中生物均能出现,但是一些经选择的细

菌种群还是可以精确测量,其数量决定饮用水处理效率和配水系统水质。

良好的饮用水水质通常被认为每百毫升水样中应少于一个大肠杆菌<sup>[11]</sup>。除了必须检查大肠菌,还应注意控制其他细菌群,因为很多来自给水系统的异养菌与人体内二次机会致病菌有联系,一些病原菌如假单胞菌、克雷柏氏杆菌、气杆菌、军团菌、耶尔森氏菌、沙门氏菌、大肠杆菌等都会粘附在输水系统内表面。在给水系统中,水噬菌体和生物膜上都能发现细菌细胞和原生动、物包囊,而且也能发现酵母、水藻、真菌<sup>[33]</sup>。尽管这些主要生物都不是致病菌,但是潜在的致病菌、致病原、动物囊体可在管网中找到适合生长的条件。

### 3.3 控制措施

消毒剂在阻止水生传染性细菌传播方面是必不可少。饮用水中致病菌的减少降低了所有工业国家水生疾病的发生频率。饮用水处理的最后消毒过程是为了去除细菌和其他种类的微生物。人们普遍使用一些氧化性消毒剂,如氯、氯胺、臭氧、过氧化氢等。

同时,人们认识到需要新的、先进的措施降低饮用水微生物对健康的威胁。为了阻止水生疾病的爆发和提供安全饮用水,给水处理应采取多种措施。这包括保护地面和地下水源,多种处理技术(包括絮凝、沉淀、过滤、消毒)以及饮用水处理系统的有效管理。促进生物膜形成的因素也应被控制,利用管道材料来控制给水系统中细菌的粘附。

然而人们仍然需要不断改进现有的传统处理技术,尤其是消毒,来降低对人体健康的威胁。维持一定的余氯并不能阻止细菌再生。即便经过氯化后,甚至在有足够浓度余氯下,依然会有细菌存在。研究人员发现氯胺会维持更长时间氯残留浓度,这些氯会更有效地破坏生物膜,比起游离氯能更好地控制生物膜形成。

## 4 结语

生物膜及其在给水系统中再生和繁殖是饮用水水质恶化的一个重要原因。影响生物膜形成的主要因素包括消毒剂及其残留浓度,饮用水中可降解化合物的浓度,给水系统使用的材料,水温等。另外,控制饮用水细菌学水质标准是非常重要的。除了检

测大肠菌,还要关注普通菌群,因为出现在生物膜中很多异养菌与人类的二次机会致病菌有关系。

根据生物膜生成的影响因素,为了控制生物膜形成,可以使用低活性、更持久性的氯胺或过氧化氢,它们可以在给水系统中维持较长的残留时间。这些杀菌剂同样会穿破生物膜,比活泼性消毒剂如游离氯能更好地控制生物膜形成。为了在水处理过程最后消毒阶段保证有足够的氯,可使用氯胺来保持持久的消毒剂残留浓度。

### 参考文献

- 李爽,张晓健. 给水管壁生物膜的生长发育及其影响因素. 中国给水排水, 2003, 19(13): 49~52
- Nagy L A and Olson B H. Occurrence and significance of bacteria, fungi and yeasts associated with distribution pipe surfaces. *Water Supply*, 1985, 11(4): 365~376
- Vander K D, Zoeteman B. Water quality in distribution systems. In: Momba M. An overview of biofilm formation in distribution systems and its impact on the deterioration of water quality. *Water SA*, 2000, 26(1): 59
- Mackay W G, Gribbon L T, Barer M R, et al. Biofilms in drinking water systems—a possible reservoir for helicobacter pylory. *Water Science Technology*, 1998, 38(12): 181~185
- 鲁巍,唐峰,张晓健,等. 净水工艺对饮用水生物稳定性控制的研究. *环境科学*, 2005, 26(6): 71~74
- Ridgway H F, Olson B H. Scanning electron microscopy evidence for bacterial colonization of a drinking water distribution system. *Applied Environmental Microbiology*, 1981, 41(1): 974~987
- Vander W E, Characklis W G. Biofilms in potablewater distribution systems. In: Mcfeters G A. *Drinking water microbiology: progress and recent developments*. New York : Springer - Verlag, 1990
- Vander K D. Potential for biofilm development in drinking water distribution systems. *Applied Microbiology Symp(Supplement)*, 1999, 85: 39~44
- Momba M. The impact of disinfection processes on biofilm formation in potable water distribution systems (Ph. D Thesis). South Africa: University of Pretoria, 1997
- Clark R M, Lykinf B W, Block J C, et al. Water quality changes in a simulated distribution system. *Water SRT - Aqua*, 1994, 43 (6): 263~277
- Momba. An overview of biofilm formation in distribution systems and its impact on the deterioration of water quality. *Water SA*, 2000, 26 (1): 59~65
- Lu W, Kiene L, Levi Y. Chlorine demand of biofilms in water distribution systems. *Water Research*, 1999, 33 (3): 827~835
- Ridgway H F, Olson B H. Chlorine resistance pattern of bacteria from drinking water systems. *Applied Environmental Microbiology*, 1982, 44: 972~987
- Brown M, Collier P J, Gilbert P. Influence of growth rate on susceptibility to antimicrobial agents; Modification of the cell envelope and batch and continuous cultural study. *Antimicrob Chemother*, 1990, 34: 1623~1628
- Al-Hiti mma, Gilbert P. Changes in preservative sensitivity for the USP antimicrobial agents effectiveness test microorganisms. *Applied Bacteriology*, 1980, 49: 119~126
- Lechevallier M W, Schalz W, Lee R G. Bacterial nutrients in drinking water. *Applied Environment Microbiology*, 1991, 57 (3): 857~862
- Vander K D, Orange J P, Hijnen WAM. Growth of pseudomonas aeruginosa in tap water in relation to utilization of substrates at concentrations of few micrograms per liter. *Applied Environment Microbiology*, 1982, 44: 1086~1095
- Rizet M, Fiessinger F, Houel N. Bacterial regrowth in a distribution system and its relationship with the quality of the feed water; case studies. In: Proc. AWWA. *Water Qual. Tech. Conf.* Miami Beach: AWWA, 1982, 1199~1214
- Servais P, Anzil A, Ventresque C. Simple method for determination of biodegradable dissolved organic carbon in water. *Applied Environment Microbiology*, 1989, 55 (10): 2732~2734
- Bernhardt H, Classen J. Eutrophication control as an essential condition for an optimum disinfection. *Water Supply*, 1993, 11 (3): 89~108
- Vander K D. Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth. *AWWA*, 1992, 84 (2): 57~65
- Lechevallier M W, Babcock T M, Lee R G. Examination and characterization of distribution system biofilm. *Applied Environmental Microbiology*, 1987, 53 (27): 2714~2724
- 周玲玲, 张永吉, 黄飞, 等. 给水管壁生物膜特性与控制方法. *净水技术*, 2008, 27 (4): 5~8
- Rogers J, Dowsett A B, Dennis P J, et al. Influence of plumbing materials on biofilm formation and growth of Legionella pneumophila in potable water systems. *Applied Environment Microbiol*, 1994, 40 (7): 1832~1851
- Olson B H. Assessment and implication of bacterial regrowth in water distribution systems. Environmental Protection Agency: U. S 600/52 - 82 - 072, 1982
- 高林. 给水系统中生物膜的特征及形成原因. *科技情报开发与经济*, 2006, 16 (10): 16~17
- Hao X, Heijnen J J, Van L M. Model-based evaluation of temperature and inflow variations on a partial nitrification-ammonia biofilm process. *Water Research*, 2002, 36 (19): 4839~4849

# 原水中投加氯化铵、硫酸铵替代液氨的可行性试验

蒋瑞卿 周 芸

(上海市自来水市南有限公司, 上海 200231)

**摘要** 利用氯化铵、硫酸铵作为加氨剂在原水处理中进行投加, 能够得到稳定的氨氮值并且具有良好的稳定性、便于运输、成本可控等优点, 可满足净水处理的要求。

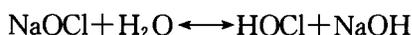
**关键词** 氯化铵 硫酸铵 有效氨氮

随着人们安全意识的逐步提高, 净水添加剂的安全运输也越来越受到重视, 由于净水处理的需要, 某些净水添加剂是必不可少的, 如液氨等具有一定危险性的添加剂势必对运输造成一定的安全隐患。为了既保证加氨的量, 又能够解决运输中的安全问题, 本文将采用氯化铵与硫酸铵作为液氨的替代物进行投加试验, 以达到液氨同样的投加效果。

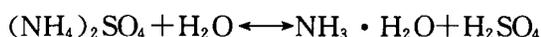
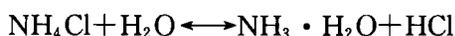
## 1 试验部分

### 1.1 氯化铵、硫酸铵和次氯酸的消毒原理

次氯酸钠在水中生成次氯酸:



氯化铵、硫酸铵在水中形成氨水:



氨和次氯酸反应, 生成氯胺:



### 1.2 试验设备及试剂

#### 1.2.1 试验设备

ZR4-6 混凝试验搅拌机; HACH 2100N 浊度仪; 上海现科仪器有限公司 MODEL 723PC 可见分光光度计。

#### 1.2.2 试剂

氯化铵特性: 常温下呈白色颗粒状, 相对密度 1.527 g/cm<sup>3</sup>, 无味, 吸潮结块, 易溶于水, 水溶液呈弱酸性。加热时酸性增强, 当加热至 100 °C 时开始显著挥发。食品级氯化铵含量 ≥ 99%。

硫酸铵特性: 无色结晶或半透明正交结晶或白色颗粒, 易溶于水, 水溶液呈弱酸性。加热至 28 °C 时分解为氨和硫酸<sup>[1]</sup>。

次氯酸钠 (1 mg/mL): 吸取有效氯为 114.5 mg/mL 的次氯酸钠溶液 2.17 mL 定容于 250 mL 容量瓶中。

聚氯化铝 (10 mg/mL): 吸取含 8.5% 氧化铝的聚氯化铝溶液 3.68 mL 定容于 250 mL 容量瓶中, 稀释溶解至 250 mL。

- 28 鲁崧. 给水管网细菌生长特性及其控制的研究: [学位论文]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 2005
- 29 白晓慧, 朱斌, 王海亮, 等. 城市供水水质生物稳定性与管网微生物生长相关性研究进展. 净水技术, 2006, 25(4): 1~4
- 30 刘小琳. 北京市给水管网管壁微生物膜群落. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(9): 78~81
- 31 白晓慧. 供水管网不同管材内壁微生物分布的显微观察. 环境科学, 2009, 30(9): 2555~2559
- 32 Schindler P, Metz H. Coliform bacteria in drinking water from South Bavaria: Identification by the API 20G system and resistance patterns. Water Sci. Tech, 1991, 24(2): 81~84
- 33 Buswell C M, Herlihy Y M, Lawrence L M, et al. Extended

survival and persistence of *Campylobacter* spp. water and aquatic biofilms and their detection by immunofluorescent antibody and rRNA staining. Applied Environment Microbiology, 1998, 64: 733~741

○ 通讯处: 100044 北京市西城区展览馆路 1 号 3 号楼 623 室

电话: 15011040926

E-mail: liuting0320@sina.com

收稿日期: 2010-06-17

修回日期: 2010-07-04