

水源与饮用水保障

卜兆宇, 张洪波, 沈亮, 等. 球墨铸铁供水管中氯与氯胺消毒的余氯衰减特性及管壁生物膜有机物组成[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 48-54, 105.

Bo Z Y, Zhang H B, Shen L, et al. Characteristics of residual chlorine decay and composition of biofilms on pipe wall in ductile iron water supply pipes under chlorine and chloramine disinfection [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 48-54, 105.

球墨铸铁供水管中氯与氯胺消毒的余氯衰减特性及管壁生物膜有机物组成

卜兆宇^{1,*}, 张洪波¹, 沈亮¹, 林涛²

(1. 扬州市建筑设计研究院有限公司, 江苏扬州 225000; 2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098)

摘要 【目的】针对氯与氯胺 2 种消毒方式, 本文系统考察球墨铸铁供水管网中余氯的衰减规律、管壁生物膜生长特性及其有机物组成及变化, 为供水管网中余氯的优化维持与消毒副产物 (DBPs) 的有效控制提供理论依据和数据支撑。【方法】试验采用某市水厂出水作为水样, 研究在环型生物膜反应器及环型生物膜反应器+管片环境下, 不同浓度氯及氯胺消毒条件下的余氯衰减特性; 同时, 研究反应器运行下, 氯及氯胺消毒条件下的单位管片面积管壁微生物量; 最后, 测定管壁生物膜中有机物组成与分布, 明确有机物组成特性。【结果】在不同消毒浓度下, 环型生物膜反应器中氯及氯胺消毒条件下余氯衰减系数分别为 $0.065\ 46\sim 0.039\ 20\ \text{h}^{-1}$ 及 $0.020\ 5\sim 0.014\ 0\ \text{h}^{-1}$, 而在环型生物膜反应器+管片环境中, 相同浓度下氯及氯胺消毒条件下余氯衰减系数分别为 $0.240\sim 0.196\ \text{h}^{-1}$ 及 $0.147\ 2\sim 0.127\ 0\ \text{h}^{-1}$; 在环型生物膜反应器+管片环境中氯胺和氯消毒条件下, 运行 3 个月时管壁生物膜生物量分别为 $(6.70\pm 0.84)\times 10^4\ \text{CFU}/\text{cm}^2$ 及 $(2.700\pm 0.297)\times 10^4\ \text{CFU}/\text{cm}^2$; 在氯及氯胺消毒前后, 生物聚合物 (BP) 质量分数分别由 48.1% 下降至 33.5%, 52.8% 下降至 45.2%。【结论】本文量化比较球墨铸铁管在氯/氯胺消毒条件下, 管壁生物膜对余氯衰减作用, 发现氯胺消毒条件下管壁生物膜作用最大可达氯消毒下生物膜作用的 1.96 倍, 同时揭示了 BP 是 DBPs 的关键前驱物。

关键词 球墨铸铁供水管; 管壁生物膜; 余氯衰减机理; 氯; 氯胺; 消毒

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0048-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.005

Characteristics of Residual Chlorine Decay and Composition of Biofilms on Pipe Wall in Ductile Iron Water Supply Pipes under Chlorine and Chloramine Disinfection

Bo Zhaoyu^{1,*}, Zhang Hongbo¹, Shen Liang¹, Lin Tao²

(1. Yangzhou Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract [Objective] Regarding the two disinfection methods of chlorine and chloramine, the mechanism of residual chlorine decay, the growth characteristics and its organic matter composition and variation of biofilms on pipe wall in ductile iron water supply pipes under chlorine and chloramine disinfection are analyzed in this paper, which is intended to provide theoretical basis and data support for content optimization of residual chlorine and control of disinfection by-products (DBPs) in water supply networks. [Methods] The finished water of one water treatment plant (WTP) was used as the sample to investigate the characteristics of chlorine residual decay under different concentrations of chlorine and chloramine disinfection in the annular biofilm reactors and the annular biofilm reactors with water supply pipe segments, respectively. Simultaneously, the microbial biofilm biomass per unit coupon

[收稿日期] 2025-08-13

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目 (51978238)

[通信作者] 卜兆宇 (1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为水质净化和生态修复工程, E-mail: 20853934@qq.com。

area on pipe walls under chlorine and chloramine disinfection was investigated; Finally, the organic matter components and distributions of biofilms on pipe wall was studied, which was intended to clarify compositional characteristics. [**Results**] Decay coefficients for chlorine and chloramine disinfection in the annular biofilm reactor ranged from $0.065\ 46\ \text{h}^{-1}$ to $0.039\ 20\ \text{h}^{-1}$ and from $0.020\ 5\ \text{h}^{-1}$ to $0.014\ 0\ \text{h}^{-1}$, respectively, under different disinfectant concentrations. However, in the annular biofilm reactors with water supply pipe segments, the decay coefficients for chlorine and chloramine disinfection ranged from $0.240\ \text{h}^{-1}$ to $0.196\ \text{h}^{-1}$ and from $0.147\ 2\ \text{h}^{-1}$ to $0.127\ 0\ \text{h}^{-1}$, respectively. In the annular biofilm reactors with water supply pipe segments under chloramine and chlorine disinfection under operation in three months, biofilm biomass reached $(6.70\pm 0.84)\times 10^4\ \text{CFU}/\text{cm}^2$ and $(2.700\pm 0.297)\times 10^4\ \text{CFU}/\text{cm}^2$, respectively; biopolymer (BP) mass fraction decreased from 48.1% to 33.5% (chlorine) and from 52.8% to 45.2% (chloramine) during pre-and post-disinfection. [**Conclusion**] This paper quantitatively compares the effects of biofilm on residual chlorine decay in ductile iron water supply pipes under chlorine and chloramine disinfection. It is founded that the maximum effect of biofilm on the pipe wall under chloramine disinfection is up to 1.96 times greater than that of chlorine disinfection on the biofilm. It is also founded that BP is the important precursor of DBPs.

Keywords ductile iron water supply pipe; biofilm on pipe wall; mechanism of residual chlorine decay; chlorine; chloramine; disinfection

供水管道是供水系统的重要组成部分,为了保证供水水质,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中明确要求:出厂水中游离氯余量不小于 $0.3\ \text{mg}/\text{L}$;出厂水中总氯余量不小于 $0.5\ \text{mg}/\text{L}$;管网末梢水中总氯余量不小于 $0.05\ \text{mg}/\text{L}$ ^[1-2]。因此,控制供水管道中的余氯量并研究余氯衰减特性对保证饮用水安全至关重要。氯和氯胺消毒是目前常用的 2 种供水消毒方式,两者存在不同的消毒原理^[3]。为了保证供水管道中的余氯含量,研究在实际管材下不同消毒方式的余氯稳定性尤为重要。

目前,超过 700 种饮用水消毒副产物(DBPs)被发现,主要包括卤乙腈类(HANs)、卤代乙酰胺类(HAcAms)、卤代硝基甲烷类(HNMs)和非卤代的亚硝胺类(NAs)等氯及氯胺 DBPs^[4-5]。这些 DBPs 具有致癌、致畸和致突变的特性,对饮用水水质安全和居民健康带来潜在的风险和威胁。水中残留的一部分有机物质会在管道输送过程中与余氯发生反应,生成 DBPs。随着研究的深入,学者发现供水管道管壁表面上黏附、成核、生长的生物膜及其产生物质会与主体水中的余氯发生反应,生成 DBPs^[6]。因此,研究管壁生物膜在出水中的生长特性及管壁生物膜的有机物特性愈发重要。

综上,本文对比常规管材特性及使用频率,找出常用供水管道,研究在常用供水管道中,氯及氯胺消毒方式下的余氯稳定性及衰减动力学;同时,研究在常用供水管道中管壁生物膜的生长特性及有机物组成分析。本文拟为自来水管网运营过程中的余氯经济性控制提供数据支撑,为不同消毒方式下的余氯

衰减控制提供依据,对饮用水安全保障有重要作用。

1 试验与方案

1.1 水样选取

连续采集某市水厂出水作为试验水样,平均水质如表 1 所示。

表 1 水样平均水质参数

Tab. 1 Average Water Quality Parameters of Water Samples

指标名称	数值
浑浊度/NTU	0.21~0.34
色度/度	5
pH 值	7.2~7.5
高锰酸盐指数/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.21~1.60
总有机碳(TOC)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2.58~2.91
氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 0.05
亚硝酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 0.002

1.2 试验环境模拟设置

本次微生物膜的培育采用环型生物膜反应器(图 1)。该反应器有效容积为 5 L,反应器中心转动轴上固定 20 个长供水管材挂片,挂片面积为 $32\ \text{cm}^2$ ($16\ \text{cm}\times 2\ \text{cm}$),装置在避光且密闭状态下连续运行,以模拟生物膜在供水管道中的生长环境,具体培育期及试验期的反应器运行参数如下:中心轴助力电机转速为 $90\ \text{r}/\text{min}$ 、剪切力为 $0.17\ \text{N}/\text{m}^2$,经实测,以上状态下模拟流速为 $0.23\ \text{m}/\text{s}$ 。试验期间通过蠕动泵控制进出水流量,保证反应器中的水力停留时间为 $8\ \text{h}$ ^[7]。

1.3 管壁微生物培育

根据早期试验,反应器连续运行 3 个月生物膜量趋于稳定^[8]。因此,本文选择 3 个月为研究周

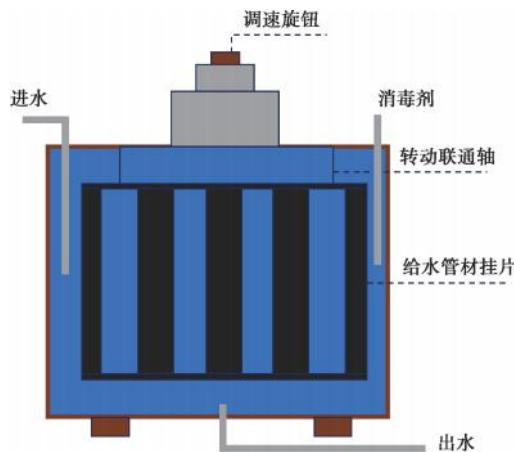


图1 环型生物膜反应器示意图

Fig. 1 Structure of Circular Biofilm Reactor

期,在微生物培育期间为了保证余氯浓度,氯/氯胺消毒剂由蠕动泵加入反应器,消毒剂质量浓度维持在 $(1.0 \pm 0.15) \text{ mg/L}$ 。在第5、10、20、30、40、50、60、70、80、90 d 分别取样,利用灭菌棉签擦拭挂片表面,每次擦拭需保持同一方向。取一根装有10 mL 磷酸盐缓冲溶液的试管(规格为50 mL),将采样后的棉签置入,补充去离子水定容,随后置入超声波清洗器超声处理20 min 以分离生物膜混合液,其中超声波频率为40 Hz,温度为20 °C。对生物膜混合液采用倍比稀释法进行稀释,选择R₂A 琼脂培养基,取1 mL 混合液接种于培养基上,37 °C 恒温培养48 h 后计数。

1.4 管壁微生物有机物组成与分布测定

针对1.3 小节中取得的生物膜混合液进行有机物特性分析,采用液相色谱-有机碳分析(LC-OCD)对有机物组分进行表征,本次主要针对亲水性化合物(CDOC)进行研究,根据分子质量,仪器将CDOC 分为以下几类(表2)。

表2 亲水性化合物分类

Tab. 2 Classification of Hydrophilic Compounds

分类	分子质量(MW)/u
生物聚合物(BP)	>20 000
腐殖质(HS)	>1 000
腐殖质降解产物(BB)	300~500
低分子酸性有机物(LMWA)	≤350
低分子中性有机物(LMWN)	≤350

采用液相色谱-有机碳分析-紫外检测器-有机氮检测器(LC-OCD-UVD-OND)联用分析仪(德国Labor 公司)测定有机物浓度和组成。样品溶液经0.45 μm 滤膜过滤后进行测定,本次测试条件如下。

LC-OCD 系统模型8, OCD 型号 NDIR, 紫外(UV)在254 nm 测量,有机氮检测器(OND)在220 nm 条件下测试,柱型号为 Tosoh TSK-HW50S (250 mm×20 mm, 30 μm),流动相磷酸盐缓冲液用去离子水配制,流速为1.1 mL/min,采用质量浓度为2.5 g/L 的KH₂PO₄ 及质量浓度为1.5 g/L 的Na₂HPO₄·2H₂O,注入量为1 000 μL。

1.5 供水管道余氯测定

采用环型生物膜反应器进行管道总余氯衰减规律探究,反应器运行3 个月,待管壁生物膜生长稳定后(1.3 小节),关闭反应器进出水,开展总余氯衰减试验。本文根据常规出厂水余氯浓度,在恒定室温 $(24.0 \pm 1.5) \text{ °C}$ 下,对反应器进行加氯,将4 组反应器初始含氯量分别调整为0.3、0.6、0.9、1.5 mg/L 后进行试验,测定不同反应时刻反应器中水体的余氯浓度。采用DR300 便携式余氯仪(美国Hach 公司)测定余氯浓度。反应时室温控制在 $(25 \pm 2) \text{ °C}$ 且避光环境。

1.6 数据分析

数据分析采用生物学专用分析软件 Graph pad Prism5.0 进行。试验结果表示采用平均值±标准误差的形式,数据用单尾检验法进行比较, $P < 0.05$ 为显著差异。

2 结果与讨论

2.1 常用供水管道管材对比研究

目前,常用的供水管道管材包括金属管材与非金属管材,金属管材包括:球墨铸铁管、不锈钢管等。由2004 年的数据可知,全国供水管网中金属管材使用率高达86%,其中使用最多的是铸铁管和钢管。非金属管材包含:聚乙烯(PE)管、硬聚氯乙烯(UPVC)管等,国家“十五”发展目标要求2015 年国内建筑供水、热水系统60%使用塑料管材,城市供水管道(DN400 以下)塑料管使用率达50%^[9]。综上,本文选择球墨铸铁管、不锈钢管、PE 管及UPVC 管作为研究对象,结合现有数据,汇总管材的适用条件、优缺点、应用现状,具体结果如表3 所示。

根据以上特点,球墨铸铁管具有抗腐蚀,爆管风险低的优点,同时球墨铸铁管在我国饮用水输配水管网中广泛采用。综上,本文选择球墨铸铁供水管作为常用供水管道进行消毒特性及管壁生物膜的有机物特性分析。

表 3 常用供水管材适用条件及优缺点对比表^[9-10]

Tab. 3 Comparison of Applicabilities, Advantages and Disadvantages of Common Water Supply Pipe Materials^[9-10]

名称	适用条件	优点	缺点
球墨铸铁管	市政供水管	存在水泥砂浆内衬、具有抗腐蚀、爆管风险低	通水初期,内衬影响水质,同时内衬脱落腐蚀加快
不锈钢管	市政管网或室内供水管、消防水管	抗腐蚀能力强、使用寿命长	与球墨铸铁管连接时存在电偶腐蚀风险
PE 管	供水管道、直径<500 mm	内壁光滑、不易结垢、耐腐蚀、材料可回收	使用管径有限制,使用初期和“死水区”存在影响水质

2.2 供水管道余氯衰减特性研究

为了研究管道中余氯衰减的衰减特性,本文采用环型生物膜反应器+球墨铸铁管材挂片及环型生物膜反应器(无管材挂片)2个条件下进行研究,以探究常用球墨铸铁管道中余氯的衰减特性。根据1.5小节供水管道余氯测定,本文采用0.3、0.6、0.9、1.5 mg/L初始氯质量浓度进行试验。本文借助一级动力学余氯衰减模型^[8],拟合水体及管道中的总余氯衰减情况,具体如式(1)。

$$C_t = C_0 \times e^{-kt} \quad (1)$$

其中: t ——反应时间,h;

C_t —— t 时刻的余氯质量浓度,mg/L;

C_0 ——初始时刻的余氯质量浓度,mg/L;

k ——余氯衰减系数, h^{-1} 。

2.2.1 水体余氯衰减特性研究

非管道情况下的余氯衰减如图2所示,随着接触时间增加,对于氯及氯胺消毒余氯浓度呈现不同下降趋势。余氯衰减动力学拟合结果如图2及表4所示。

综上,初始投氯量增加,主体水余氯衰减系数越低,这是因为水体中的有机物是一定的,初始投氯浓度低时,消毒剂会优先与还原性较强物质发生反应;而初始投氯量较高时,消毒剂与有机物的快速反应及慢反应同时发生,从而导致初始投氯量增加而主体水余氯衰减系数越低^[11]。

同时,氯胺消毒下主体水余氯衰减速率明显低于氯消毒。这是因为当氯胺消毒时只有当主体水中次氯酸(HClO)被消耗后^[12-13],反应才会进一步进行,因此氯胺消毒作用缓慢,衰减系数小。

2.2.2 管道余氯衰减特性研究

管道模拟情况下的余氯衰减动力学拟合结果如图3及表5所示。

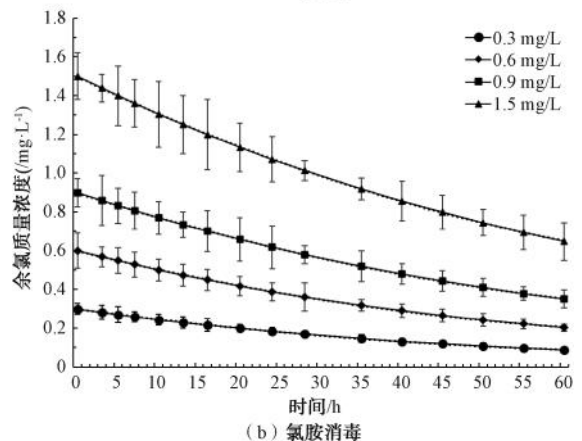
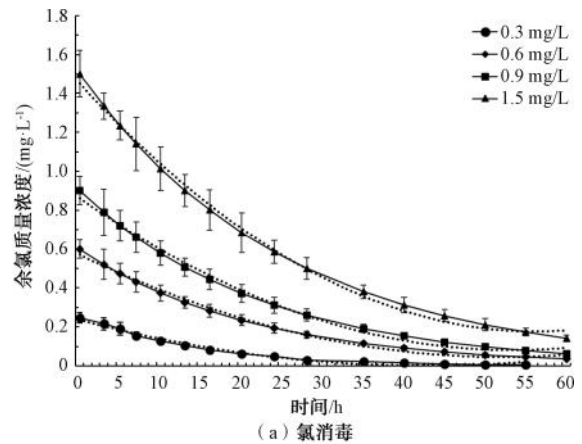


图 2 氯及氯胺消毒下主体水余氯衰减变化及拟合曲线
Fig. 2 Changes and Fitting Curves of Residual Chlorine Decay in Water Samples under Chlorine and Chloramine Disinfection

与主体水余氯衰减相似,随着初始投氯量增加,衰减系数均呈现下降趋势,且氯胺消毒下余氯衰减系数较低。将主体水余氯衰减系数与管道总余氯衰减系数比较,发现管道余氯衰减系数明显高于主体水余氯衰减系数。这是因为管道管壁上含有管壁生物膜,生物膜聚集的大量物质可与消毒剂发生反应,且微生物及其分泌物的脱落会进一步增大余氯的衰减^[14-15]。将管道总余氯衰减系数与主体水余氯衰

表4 氯及氯胺消毒下主体水余氯衰减动力学拟合分析表
Tab. 4 Analysis of Dynamic Fittings of Residual Chlorine Decay in Water Samples under Chlorine and Chloramine Disinfection

初始投氯量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	消毒方式	$K_b/(\text{h}^{-1})$	拟合度 R^2
0.3	氯消毒	0.065 46	0.993 2
0.6	氯消毒	0.047 06	0.991 2
0.9	氯消毒	0.044 20	0.985 9
1.5	氯消毒	0.039 20	0.979 2
0.3	氯胺消毒	0.020 50	0.994 1
0.6	氯胺消毒	0.018 10	0.990 1
0.9	氯胺消毒	0.015 70	0.985 1
1.5	氯胺消毒	0.014 00	0.982 6

注: K_b —主体水试验的余氯衰减系数。

表5 氯及氯胺消毒下管道内余氯衰减动力学拟合分析表
Tab. 5 Analysis of Dynamic Fittings of Residual Chlorine Decay in Water Supply Pipes under Chlorine and Chloramine Disinfection

初始投氯量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	消毒方式	$K/(\text{h}^{-1})$	k	R^2
0.3	氯消毒	0.240 0	3.67	0.989 2
0.6	氯消毒	0.224 9	4.78	0.982 1
0.9	氯消毒	0.210 1	4.75	0.979 5
1.5	氯消毒	0.196 0	5.00	0.976 3
0.3	氯胺消毒	0.147 2	7.18	0.992 1
0.6	氯胺消毒	0.144 4	7.98	0.985 2
0.9	氯胺消毒	0.142 3	9.06	0.980 6
1.5	氯胺消毒	0.127 0	9.07	0.979 9

注: K —管道内的余氯衰减系数; k 为 K 与 K_b 的比值。

2.3 供水管道管壁微生物生长特性

对环型生物膜反应器运行期间,按照 1.3 小节的试验方法,对氯及氯胺消毒下的单位管片面积管壁微生物量进行测量,研究不同消毒剂下的管壁微生物生长特性,具体结果如图 4 所示。

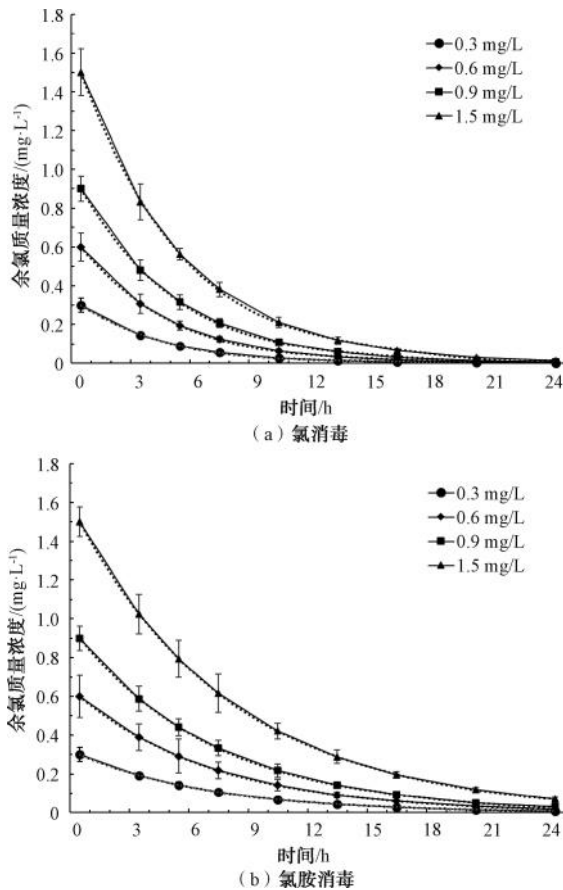


图3 氯及氯胺消毒下管道内余氯衰减变化及拟合曲线
Fig. 3 Changes and Fitting Curves of Residual Chlorine Decay in Water Supply Pipes under Chlorine and Chloramine Disinfection

减系数对比; K/K_b ,发现在氯胺消毒下的微生物对余氯衰减作用明显高于氯消毒下的微生物作用。

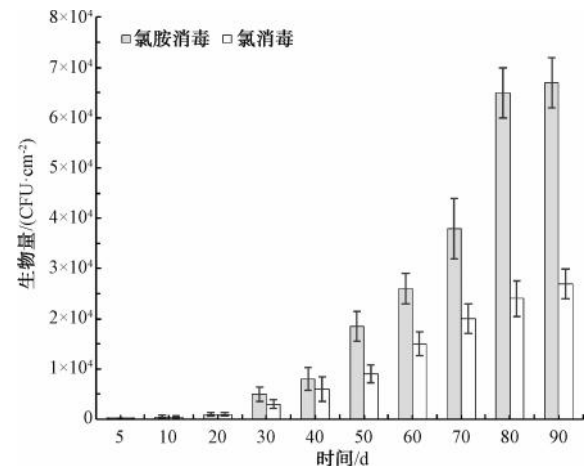


图4 氯及氯胺消毒下管壁生物膜生物量变化

Fig. 4 Changes of Biomass in Biofilms on Pipe Wall under Chlorine and Chloramine Disinfection

根据试验结果氯胺消毒下的单位面积生物量高于氯消毒,氯胺消毒下管壁生物膜生物量含量较高,这可能是因为氯胺消毒下,管壁生物膜对余氯衰减产生了影响,这与 Wang 等^[16]研究结论相似。在氯胺和氯消毒条件下,运行 3 个月时管壁生物膜生物量分别为 $(6.70 \pm 0.84) \times 10^4 \text{ CFU}/\text{cm}^2$ 及 $(2.700 \pm 0.297) \times 10^4 \text{ CFU}/\text{cm}^2$ 。

氯作为一种非选择性氧化剂,很容易与各种有机物质发生反应,可以更有效地引起管壁生物膜剥

离脱落。氯胺消毒技术氧化性比自由氯弱,且氯胺消毒机制与其破坏细菌代谢和与蛋白质等特异反应的能力有关。因而导致在氯胺条件下,管片单位面积生物量较高。

虽然研究中表明,氯胺在生物膜中穿透能力更强,但试验发现氯胺通常需要更长的反应时间对管壁生物膜消毒灭活,这与部分试验结果^[17-18]相似。

早期研究^[12]还发现,氯胺自衰减产生的自由氯可以被细菌吸收,从而促进管壁微生物的繁殖,这也可以一定程度上导致了本次氯胺消毒下管片单位面积生物量较高。

2.4 管壁生物膜有机物组成特性研究

本文测定管壁生物膜中有机物含量与分布,以明确管壁生物膜有机物组成特性,为后期 DBPs 的研究奠定基础。氯消毒前后管壁生物膜中有机物质量分数与分布结果如表 6 所示。

表 6 氯消毒前后管壁生物膜中有机物组成与分布
Tab. 6 Composition and Distribution of Organics in Biofilms on Pipe Wall under Chlorine Disinfection

有机物名称	MW/u	CDOC	
		消毒前	消毒后
LWMN	≤350	16.6%	24.6%
LMWA	≤350	2.0%	3.5%
BB	300~500	12.3%	12.7%
HS	>1 000	21.0%	25.7%
BP	>20 000	48.1%	33.5%

由表 6 可知,氯消毒前 CDOC 中 5 种不同性质的亲水性化合物占比从大到小排序为:BP>HS>LMWN>BB>LMWA,其中 BP 质量分数具有显著优势,占比为 48.1% CDOC;氯消毒后,生物膜中 BB、HS、LMWA 和 LMWN 占比有所上升,BP 占比有所下降且较明显,由 48.1%下降至 33.5%,表明 BP 是氯消毒体系中管壁生物膜中较为重要的有机物。

氯胺消毒前后管壁生物膜中有机物质量分数与分布结果如表 7 所示。

由表 7 可知,氯胺消毒前 CDOC 中 5 种不同性质的亲水性化合物占比从大到小排序为:BP>HS>LMWN>BB>LMWA,其中 BP 质量分数具有显著优势,CDOC 占比为 52.8%;氯消毒后,生物膜中 HS、LMWA 和 LMWN 占比有所上升,BB 及 BP 占比有所下降且 BP 下降较明显,由 52.8%下降至 45.2%,表明 BP 也是氯胺消毒体系中管壁生物膜中较为重

表 7 氯胺消毒前后管壁生物膜中有机物组成与分布
Tab. 7 Composition and Distribution of Organics in Biofilms on Pipe Wall under Chloramine Disinfection

有机物名称	MW/u	CDOC	
		消毒前	消毒后
LWMN	≤350	15.3%	18.8%
LMWA	≤350	2.5%	3.2%
BB	300~500	11.3%	8.2%
HS	>1 000	18.1%	24.6%
BP	>20 000	52.8%	45.2%

要的有机物。

上述结果发现,氯胺消毒前后与氯消毒前后管壁生物膜有机物组分构成基本相似,在亲水性化合物中,BP 在消毒前后占比最高,且均呈现显著下降趋势。

对比氯及氯胺消毒前后 BP 比例变化,可以发现氯胺生物膜中 BP 质量分数占比较高,但氯消毒前后 BP 质量占比变化幅度更大。根据早期试验发现,BP 属于 DBPs 前驱物,且主要是由多糖、蛋白质和多核苷酸这 3 大类物质组成,在消毒剂作用下会转化为 DBPs 且具有较高的 DBPs 生成势^[19-20]。这也与本次试验结论中 BP 下降趋势显著的现象符合,因此可以推断在氯和氯胺消毒体系中,BP 可能对 DBPs 的生成有重要影响。

3 结论

(1)经对比,球墨铸铁管具有抗腐蚀、爆管风险低、在输配水管网中广泛采用的特点,在我国饮用水输配水管网中广泛采用。

(2)受管壁生物膜影响,供水管道中余氯衰减系数明显高于主体水余氯衰减系数,且在氯胺消毒下管壁生物膜作用最大可达氯消毒的 1.96 倍。可为供水管网运营过程中的余氯经济性控制提供数据支撑。

(3)在氯胺消毒下管壁生物膜中的管片单位面积生物量高于氯消毒,氯胺衰减可能会与生物膜生长存在相互促进作用。

(4)在管壁生物膜有机物分析中,BP 在氯及氯胺消毒前占比最高,消毒后均呈现显著下降趋势。可以揭示在氯和氯胺消毒体系中,BP 是 DBPs 的关键前驱物,可在今后加强对 BP 的转化机理及去除控制的相关研究。

参考文献

- [1] 徐斌. 饮用水消毒衍生的新兴水质问题及控制策略[J]. 净水技术, 2022, 41(6): 1-6, 133.
Xu B. Emerging water quality problems derived from disinfection of drinking water and control strategies[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(6): 1-6, 133.
- [2] 文刚, 吴戈辉, 万琪琪, 等. 丝状真菌——城镇供水系统生物风险和安全保障的新挑战[J]. 净水技术, 2022, 41(3): 1-11, 19.
Wen G, Wu G H, Wan Q Q, et al. Filamentous fungi: New challenge and safety control of biological risk in urban water supply system[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 1-11, 19.
- [3] 朱元欣, 范恽珉, 姚祺. 城市污水中卤代乙腈、卤代硝基甲烷、卤代乙酰胺类消毒副产物的探讨[J]. 净水技术, 2024, 43(s2): 284-292, 322.
Zhu Y X, Fan Y M, Yao Q. Discussion on disinfection by-products of halogenoacetonitrile, halonitromethane and haloacetamide in urban wastewater [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(s2): 284-292, 322.
- [4] Yu S L, Lin T, Chen W, et al. The toxicity of a new disinfection by-product, 2, 2-dichloroacetamide (DCAcAm), on adult zebrafish (*Danio rerio*) and its occurrence in the chlorinated drinking water[J]. Chemosphere, 2015, 139: 40-46. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.05.079.
- [5] Lin T, Zhou D J, Yu S L, et al. The removal process of 2, 2-dichloroacetamide (DCAcAm), a new disinfection by-product, in drinking water treatment process and its toxicity on zebrafish [J]. Chemosphere, 2016, 159: 403-411. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.06.029.
- [6] 陈停, 徐叶琴, 李冬平, 等. 供水管网生物膜特征及对消毒副产物生成势的影响[J]. 供水技术, 2019, 13(1): 1-5.
Chen T, Xu Y Q, Li D P, et al. Characteristics of biofilm and influence on the potential of disinfection by-products in pipe wall of water supply network[J]. Water Technology, 2019, 13(1): 1-5.
- [7] 汪菲, 林圣岚, 朱晓之, 等. 以管壁生物膜为前体物的DBPs生成特性和毒性评估[J]. 中国给水排水, 2024, 40(11): 31-40.
Wang F, Lin S L, Zhu X Z, et al. Formation of disinfection byproducts from pipe wall biofilm and their toxicity evaluation [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(11): 31-40.
- [8] 钟丹, 袁一星, 马文成, 等. 供水管网内生物膜与余氯衰减交互作用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(8): 49-54.
Zhong D, Yuan Y X, Ma W C, et al. Interaction effects between biofilm and chlorine decay in water distribution network [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(8): 49-54.
- [9] 李相宜, 赵蓓, 游晓旭, 等. 供水管道管材的特性及应用综述[J]. 净水技术, 2021, 40(7): 52-59.
Li X Y, Zhao B, You X X, et al. General review of characteristics and application for water supply pipeline materials [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(7): 52-59.
- [10] 陈能, 信昆仑, 莫宇琨. 基于管材分类的供水管网爆管风险预测模型[J]. 净水技术, 2018, 37(1): 112-116.
Chen N, Xin K L, Mo Y K. Model of risk prediction for water supply pipelines burst based on pipe material classification[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(1): 112-116.
- [11] 陈金凤, 姚宁, 汪裕昌, 等. 含氮消毒副产物的生成机理与富集技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2024, 40(6): 46-52.
Chen J F, Yao N, Wang Y C, et al. Research progress on formation mechanism and enrichment technology of nitrogenous disinfection by-products[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(6): 46-52.
- [12] 马凯, 杨建军, 胡建坤. 氯胺给水系统管网水余氯衰减控制策略分析[J]. 供水技术, 2021, 15(1): 7-12.
Ma K, Yang J J, Hu J K. Analysis on the strategy on controlling chlorine residual decay in pipeline water for the chloraminated water supply system[J]. Water Technology, 2021, 15(1): 7-12.
- [13] Shen Y, Huang C H, Lin J, et al. Effect of disinfectant exposure on *Legionella pneumophila* associated with simulated drinking water biofilms: Release, inactivation, and infectivity [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(4): 2087-2095.
- [14] 侍路梦, 吴慧芳, 王玉敏, 等. 供水管网余氯衰减变化规律及模型研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 52-57, 62.
Shi L M, Wu H F, Wang Y M, et al. Decay pattern and model of residual chlorine in water supply network[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 52-57, 62.
- [15] Waak M B, LaPara T M, Hallé C, et al. Nontuberculous mycobacteria in two drinking water distribution systems and the role of residual disinfection [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(15): 8563-8573.
- [16] Wang Z K, Li L, Ariss R W, et al. The role of biofilms on the formation and decay of disinfection by-products in chlor(am)-inated water distribution systems [J]. Science of the Total Environment, 2021, 753: 141606. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141606.
- [17] 黄河, 徐斌, 朱文倩, 等. 长江沿线城市水源氯(胺)化消毒副产物生成潜能研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2497-2504.
Huang H, Xu B, Zhu W Q, et al. Distribution of disinfection by-product formation potential by chlor(am)ination in three megalopolis along Yangtze River [J]. China Environmental Science, 2014, 34(10): 2497-2504.

(下转第105页)

- 净水技术, 2023, 42(S1): 194-199.
- Chen H, Yang B, Qiao Q. Pretreatment of acetonitrile production wastewater by AOPs [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(S1): 194-199.
- [7] 袁志文, 熊斌. 厌氧折流板反应器(ABR)在工业废水处理上的应用[J]. *净水技术*, 2012, 31(2): 15-18.
- Yuan Z W, Xiong J. Application of anaerobic baffled reactor (ABR) processes for industrial wastewater treatment[J]. *Water Purification Technology*, 2012, 31(2): 15-18.
- [8] Wang X, Wang T, Meng H, et al. Anammox process in anaerobic baffled biofilm reactors with columnar packings: Characteristics of flow field and microbial community [J]. *Chemosphere*, 2024, 355: 141774. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141774.
- [9] 曹鹏飞, 任学昌, 陈作雁, 等. AO工艺高效处理N, N-二甲基甲酰胺废水的研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2024, 43(4): 134-144.
- Cao P F, Ren X C, Chen Z Y, et al. Study on the efficient treatment of N, N-dimethylformamide wastewater by AO process [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2024, 43(4): 134-144.
- [10] 王万鑫, 王建芳, 钱飞跃, 等. 厌氧折流板反应器处理N, N-二甲基乙酰胺效能及其微生物群落特征[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(9): 1094-1100.
- Wang W X, Wang J F, Qian F Y, et al. The efficiency of ABR on treating DMAC wastewater and the characteristics of microbial community[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(9): 1094-1100.
- [11] 郑诗纯, 梅凯. 精细化工氯化蔗糖废水站处理工艺改造[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(16): 68-70.
- Zheng S C, Mei K. Process reconstruction in chlorinated sucrose wastewater treatment station in a fine chemical plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(16): 68-70.
- [12] 张晶瑶. 某污水处理厂进水水质分析与扩建升级改造工艺方案[J]. *净水技术*, 2024, 43(6): 135-144.
- Zhang J Y. Analysis of influent water quality and process scheme of expansion, upgrading and reconstruction project of a WWTP [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(6): 135-144.

(上接第54页)

- [18] Wastensson G, Eriksson K. Inorganic chloramines: A critical review of the toxicological and epidemiological evidence as a basis for occupational exposure limit setting[J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2020, 50(3): 219-271.
- [19] 尹文选, 孙文俊, 张道义, 等. 溶解性有机物在UV/H₂O₂工艺中的去除、化学转化及副产物控制研究[J]. *给水排水*, 2025, 51(7): 15-22.
- Yin W X, Sun W J, Zhang D Y, et al. Research on the removal, chemical conversion, and by-product control of dissolved organic matter in the UV/H₂O₂ process[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2025, 51(7): 15-22.
- [20] Douterelo I, Husband S, Boxall J B. The bacteriological composition of biomass recovered by flushing an operational drinking water distribution system[J]. *Water Research*, 2014, 54: 100-114. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.049.