

给水管网管壁铁细菌生长特性模拟及控制对策研究

王洋, 张晓健*, 陈雨乔, 陆品品, 陈超

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 利用 AR 反应器对管壁铁细菌的生长特性、影响因素以及悬浮铁细菌与管壁铁细菌的相关关系进行了研究. 管壁铁细菌在反应器运行 12 d 后达到稳定生长, 出水中铁细菌数量比进水增加 1 lg, 剪切力对于铁细菌达到稳定生长的时间有影响, 但对稳定生长后挂片上的铁细菌数量没有明显的影响. 稳定余氯 0.3 mg/L 可以有效控制悬浮和管壁铁细菌的生长, 数量降低 1 lg; 对于管垢内的铁细菌即使余氯增加到 1.0 mg/L 仍无法杀灭; 余氯浓度 0.05 mg/L 无法有效控制悬浮和管壁附着铁细菌的生长. 对于稳定生长下的管壁铁细菌, 增加余氯浓度至 1.25 mg/L, 可使管壁铁细菌数量降低 2 lg ~ 3 lg. 稳定生长状态下, 悬浮铁细菌与管壁铁细菌数量具有线性关系. 并在试验基础上提出给水管网铁细菌生长控制对策: 维持管网余氯 0.3 mg/L; 定期采用较高浓度消毒剂冲洗管道; 采用新型防腐管材或加快旧管网改造, 提高管网抗腐蚀性能等.

关键词: 铁细菌; 给水管网; 生长特性; 腐蚀控制; 余氯

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3293-07

Growth Characteristics and Control of Iron Bacteria on Cast Iron in Drinking Water Distribution Systems

WANG Yang, ZHANG Xiao-jian, CHEN Yu-qiao, LU Pin-pin, CHEN Chao

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This study investigated the growth characteristics of iron bacteria on cast iron and relationship between suspended and attached iron bacteria. The steady-state growth of iron bacteria would need 12 d and iron bacteria level in effluents increased 1 lg. Hydraulics influence on iron bacteria level and detachment rate of steady-state attached iron bacteria was not significant. But it could affect the time of attached iron bacteria on cast-iron coupons reaching to steady state. When the chlorine residual was 0.3 mg/L, the iron bacteria growth could be controlled effectively and suspended and attached iron bacteria levels both decreased 1 lg. When the chlorine residual was more than 1.0 mg/L, it could not inactivate the iron bacteria of internal corrosion scale yet. There was little effect on inhibiting the iron bacteria growth that the chlorine residual was 0.05 mg/L in drinking water quality standard of China. The iron bacteria on coupons reached to steady state without disinfectant and then increased the chlorine residual to 1.25 mg/L, the attached iron bacteria level could decrease 2 lg to 3 lg. Under steady-state, the suspended iron bacteria levels were linearly dependent on the attached iron bacteria. The control of iron bacteria in drinking water distribution systems was advanced: maintaining the chlorine residual (0.3 mg/L), flushing the pipeline with high dosage disinfectant, adopting corrosion-resistant pipe materials and renovating the old pipe loop.

Key words: iron bacteria; drinking water distribution system; growth characteristics; corrosion control; chlorine residual

随着生活水平的提高, 人们对于饮用水的水质要求也越来越高, 供水行业面临着越来越严峻的挑战. 目前我国供水管道 90% 以上使用的是铸铁管、钢管, 管网腐蚀现象严重^[1,2]. 对于大型管网, 管网水在输配过程中有较长的停留时间, 由于管网二次污染使得用户出水存在浊度、铁含量和细菌总数超标的现象^[3,4].

铁细菌等微生物通过其生命活动引起或促进管材腐蚀破坏, Cloete 等^[5]依据在消毒和不消毒条件下的腐蚀试验结果, 认为微生物腐蚀引起了整个管道腐蚀损失的 40%. Ridgwat 等^[6]和 Chamtiyski 等^[7]对给水管网中不同管材管段中的水和管壁进行了检测, 发现水中 and 管壁上有大量铁细菌存在. 对实际给水管网中铁细菌进行检测发现^[8], 管网水中铁细菌

含量为 $0 \sim 10^7$ CFU/mL. 袁一星等^[9]曾通过断管试验检查了管道内壁锈垢表、中、里三层的细菌菌属, 均发现普遍存在着丝状铁细菌. 给水管网铁细菌引起的主要危害包括^[10,11]: ①腐蚀管网, 降低管网寿命; ②增加出水色度、嗅味和浊度, 严重时产生“红水”; ③促进生物膜生长, 增加出水的生物不稳定性; ④引起消毒剂(余氯等)和溶解氧的衰减; ⑤促进管网结垢, 造成输水能耗的增加等.

目前对于铁细菌在管壁上的生长特性研究较

收稿日期: 2008-12-21; 修订日期: 2009-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578081); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z301)

作者简介: 王洋(1982~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为给水管网水质稳定性, E-mail: wangyang00@mails.tsinghua.edu.cn

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

少,本实验通过实验室模拟反应器,分析不同条件下铁细菌在管壁上的生长特性以及水力条件、余氯等对其生长的影响,得到管壁铁细菌生长的控制对策,减少由铁细菌引起的管网腐蚀.

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验菌种

Lepothrix discophora 属于兼性营养菌^[12],是自然界分布很广的一种铁细菌.在含有亚铁的天然水中该

细菌能够进行自养性生长,在不含有亚铁但有有机物的环境中,例如人工培养的条件下,该细菌也可以进行异养性生长^[13].这种细菌能够产生一种铁氧化蛋白^[14],氧化生成的氢氧化铁在菌体外形成鞘层.

试验采用 *Lepothrix discophora* (ATCC43182) 作为铁细菌代表菌种进行接种试验,该菌种复活后,26℃ 下经过 3 d 的培养,得到棕色、平滑菌落.镜检判断该细菌属于革兰氏阴性菌,细长杆菌,呈单个、成对及成链出现^[15],其特征与 *Lepothrix discophora* (ATCC 43182) 相吻合,如图 1 所示.

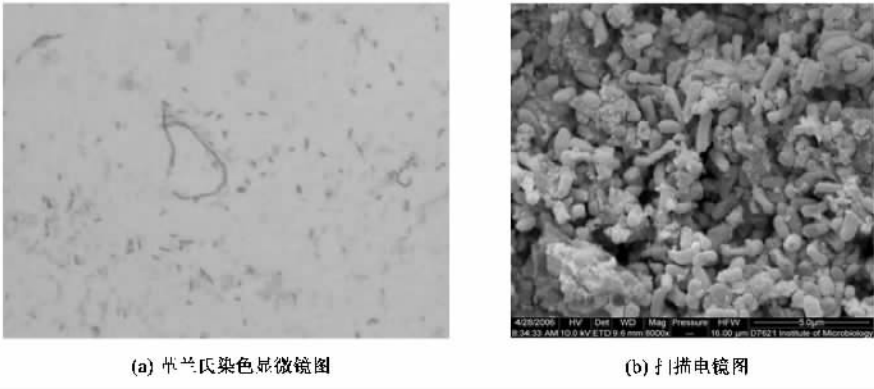


图 1 *Lepothrix discophora* (ATCC 43182) 照片
Fig.1 Photographs of *Lepothrix discophora* (ATCC 43182)

1.1.2 试验用水

试验用水采用清华自来水接种 *Lepothrix discophora* (ATCC 43182),水质指标如表 1 所示.

表 1 试验用水部分水质指标

Table 1 Water parameters in the experiment						
pH	DO /mg·L ⁻¹	水温 /℃	TOC /mg·L ⁻¹	AOC μg·L ⁻¹	总铁 /mg·L ⁻¹	余氯 /mg·L ⁻¹
8.2	2.6	20~25	0.4	33	0.02	0

1.1.3 挂片材料

挂片材料是 HT200 铸铁,使用前用丙酮和无水乙醇擦洗并在干燥器中干燥 4 h 以上^[16],并做记号以相互区别.

1.2 试验方法及流程

1.2.1 测定方法

Lepothrix discophora 采用 ATCC1503 # 培养基进行培养^[17].

管壁上的铁细菌采用如下步骤转移到水相进行测定:①将挂片取出后,用无菌水淋洗表面,将未附着的铁细菌洗掉;②使用 4 根灭菌棉签先后向下擦拭挂片附着铁细菌面各 5 次,擦拭完后将 4 根棉签一起放入盛有 100 mL 缓冲溶液的锥形瓶中,超声振

荡.经试验证明,超声波作用时间控制在 20 min 内基本不会造成铁细菌的损失,可最大程度地清洗分离棉签上的铁细菌.试验选用了 KQ-500B 型超声波清洗器,超声电功率 500 W,工作频率 40 kHz,洗槽容积 22.5 L,温度为常温.③取水相铁细菌进行测定,从而计算管壁铁细菌数量.

1.2.2 试验装置

试验采用 AR(annular reactor)反应器(如图 2),装置流程见图 3.

1.2.3 试验过程及条件

将纯菌种复活富集培养后,按照一定比例在配水罐内与清华自来水混合,然后经蠕动泵输送入 AR 反应器中,在反应器内的水力停留时间为 1.3 h.

分别在转速为 220 r/min 和 460 r/min 条件下模拟稳定水力条件下铁细菌生长特性,这 2 个转速对应的剪切力分别为 0.4 N/m² (相当于管径 DN800,流速 0.5 m/s) 和 1.0 N/m² (相当于管径 DN200,流速 0.8 m/s).

稳定余氯条件下铁细菌生长试验中,向反应器中连续投加一氯胺,维持反应器内稳定余氯条件,研究稳定余氯条件下铁细菌的生长,余氯分别为:0.05

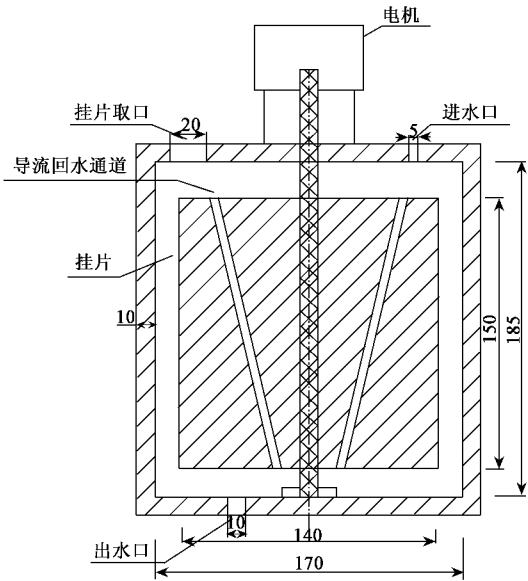


图 2 试验用 AR 反应器

Fig.2 Annular reactor in the experiment

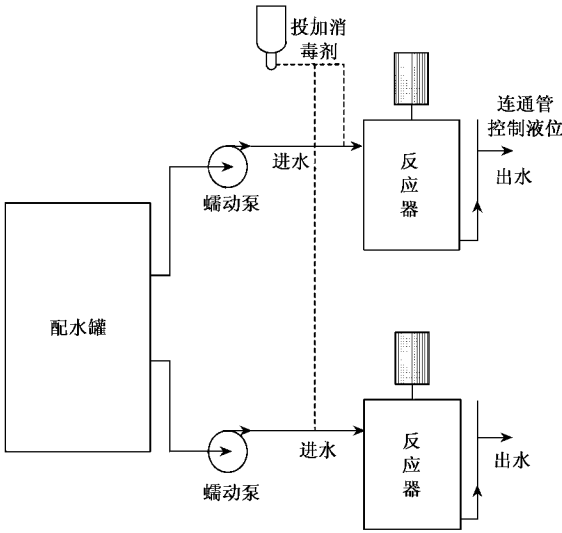
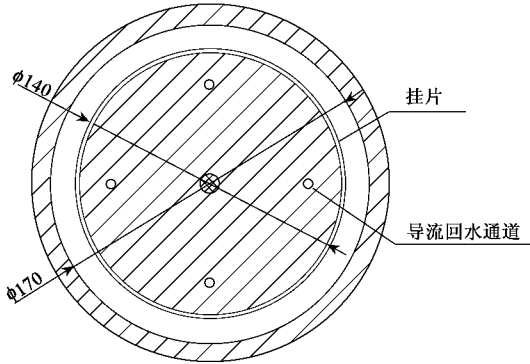


图 3 试验装置流程示意

Fig.3 Flow chart of the experiment

mg/L、 (0.3 ± 0.05) mg/L、 (1.0 ± 0.05) mg/L.

变化余氯条件对铁细菌生长的影响试验中, 初始不投加一氯胺, 当管壁铁细菌生长稳定后, 开始投加一氯胺, 并且使得余氯浓度不断增加至 1.25 mg/L, 随后停止投加一氯胺, 研究改变余氯浓度对管壁铁细菌生长的影响.

2 结果与讨论

2.1 稳定水力条件下铁细菌稳定生长特性

图 4(a)是稳定水力条件下, 反应器进出水铁细菌数量随反应器运行时间的变化. 反应器运行初期进水铁细菌浓度约为 10^5 CFU/mL, 出水铁细菌数量略高于进水铁细菌数量; 随着运行时间的增加, 进水铁细菌浓度维持在 $10^4 \sim 10^5$ CFU/mL, 当反应器稳定运行后, 出水铁细菌数量比进水铁细菌数量增加约 1 lg.

试验中反应器是连续进水出水, 造成出水铁细菌浓度增加的原因是铁细菌在反应器内附着生长, 挂片上铁细菌数量不断增加, 由于转子转动形成的剪切力使得挂片上的部分铁细菌重新脱落进入水中, 因此使得出水铁细菌数量明显高于进水铁细菌数量.

图 4(b)是稳定水力条件下, 挂片上铁细菌数量随反应器运行时间的变化. 当反应器运行至 288 h (12 d), 2 个反应中挂片上铁细菌的生长基本达到稳定.

2.2 剪切力对铁细菌生长的影响

由图 4(b)可以看出, 在反应器运行的初期即 288 h 之前, 剪切力 1.0 N/m^2 的反应器中挂片上铁细菌数量低于 0.4 N/m^2 的反应器, 这是因为剪切力较大条件下, 细菌不易附着生长. 但是随着挂片上铁细菌生长的逐渐稳定, 2 个反应器运行 288 h 后, 挂片上的铁细菌差别不大, 说明稳定水力条件下, 剪切力对于管壁上附着生长的铁细菌数量影响不大.

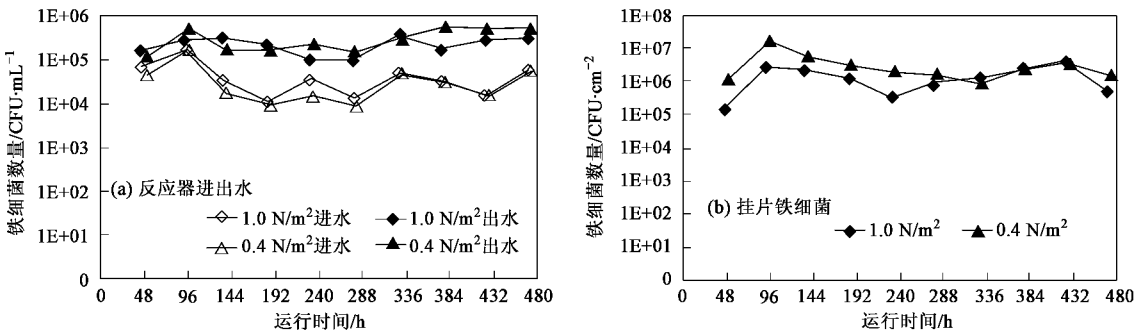


图 4 稳定水力条件下反应器进出水和挂片上铁细菌数量

Fig.4 Iron bacterial levels of influent, effluent and attached under steady-state

2.3 消毒剂对铁细菌生长特性的影响

2.3.1 稳定余氯条件对铁细菌生长的影响

表 2 列出的是稳定余氯条件下,铁细菌达到稳定生长后,反应器进出水铁细菌数量的变化情况.

表 2 稳定余氯条件下反应器出水铁细菌与进水铁细菌数量的差值(lg)

Table 2 Iron bacteria level difference of effluent and influent under stated chlorine residual (lg)

余氯 /mg•L ⁻¹	时间/d				稳定生长 平均值
	0	12	14	16	
0	0	2.40	2.54	2.67	2.54
0.05	0	2.34	2.35	2.45	2.38
0.3	0	0.92	1.16	1.05	1.04
1.0	0	0.25	0.26	0.02	0.18

随着余氯浓度的增加,稳定运行后的出水铁细菌相应减少.当余氯达到 1.0 mg/L时,进出水铁细菌数量相当,说明余氯浓度为 1.0 mg/L能够有效控制管网水中铁细菌的生长.《生活饮用水卫生标准 GB 5749-2006》^[18]中规定的管网末梢余氯浓度 0.05 mg/L与无消毒剂情况下的出水铁细菌数量相当,无法控制铁细菌的生长.现有研究表明,控制给水管网铁化学稳定性所需要的余氯浓度为 0.3 mg/L^[19],试验中反应器内余氯浓度保持在 0.3 mg/L时,反应器出水的铁细菌浓度与不投加消毒剂相比降低约 1 lg.

表 3 列出的是稳定余氯条件下,铁细菌达到稳定生长后,挂片上铁细菌数量.

当水中余氯浓度维持在 0.05 mg/L时,挂片上铁细菌数量与没有消毒剂时的相差不多,说明该余氯条件无法控制管壁铁细菌的生长.当余氯浓度维持在 0.3 mg/L时,挂片上铁细菌的数量比没有消毒剂时减少了约1 lg,说明该余氯浓度对管壁铁细菌的生长有一定的控制作用.当余氯浓度维持在 1.0 mg/L

时,挂片上铁细菌的数量比 0.3 mg/L时略有减少,并没有明显降低.

表 3 稳定余氯条件下反应器挂片上铁细菌的数量(lg)

Table 3 Attached iron bacteria level on coupons under stated chlorine residual (lg)

余氯 /mg•L ⁻¹	时间/d				稳定生长 平均值
	0	12	14	16	
0	0	6.95	6.71	6.86	6.84
0.05	0	7.17	6.43	6.81	6.80
0.3	0	5.80	5.63	5.34	5.59
1.0	0	5.11	5.81	5.16	5.36

有研究表明当余氯浓度维持在 1.0 mg/L时,可完全抑制管壁生物膜的生长^[11].但是本试验的结果表明,1.0 mg/L的余氯浓度无法完全抑制管壁铁细菌的生长.这主要是因为生物膜主要生长在管壁腐蚀产物表面,增加余氯浓度可以有效地控制生物膜的生长.但是如图 5 所示,铁细菌与一般生物膜不同在于管壁腐蚀形成的管垢内也有铁细菌存在,而这

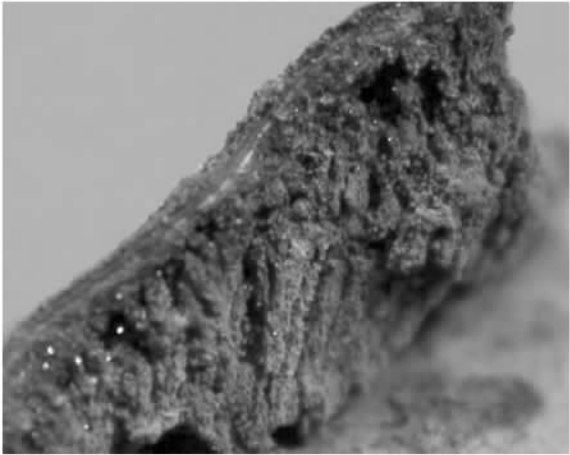


图 5 实际管网管垢内部铁细菌形成的多孔结构

Fig.5 Filamentous structure of iron bacteria in corrosion scale in distribution systems

部分铁细菌由于被管垢包裹,消毒剂无法渗入到腐蚀产物内部杀灭这部分铁细菌.因此当管网水中维持较高余氯时,管壁仍会有铁细菌生长.同时,从铁细菌数量分布上可以看出,铁细菌主要生长在腐蚀产物内部.

所以在实际管网运行中,为了有效控制铁细菌的生长减少管网腐蚀,同时保证管网化学稳定性,应该保证管网余氯浓度为 0.3 mg/L.

2.3.2 变化余氯条件对铁细菌生长的影响

图 6 是变化余氯条件下铁细菌生长情况.初始不投加一氯胺,随着反应器的运行,挂片上铁细菌数量不断增加并趋于稳定生长.

运行 12 d 后,投加一氯胺维持一定的余氯浓度,并每 2 d 增加一次余氯浓度.随着余氯浓度的不断升高,出水及挂片上的铁细菌均不断的减少,当余氯达到 1.25 mg/L 时,基本抑制了水中铁细菌的生

长.挂片上铁细菌在余氯从 0.6 mg/L 增加到 1.25 mg/L 的过程中基本保持稳定,比未投加一氯胺时降低了约 2 lg.与稳定余氯 1.0 mg/L 条件下挂片上铁细菌数量相比,余氯从 0 增加到 1.25 mg/L 过程中形成的腐蚀产物要少一些,腐蚀产物内的铁细菌数量相对降低约 1 lg.

随后停止投加一氯胺,出水及挂片上铁细菌迅速增加,约 7 d 后达到稳定生长.稳定生长后出水与挂片上的铁细菌数量高于初始稳定状态下的铁细菌数量.这主要是因为发生腐蚀后的挂片表面凹凸不平,铁细菌更容易附着生长.

对于大型管网,管网末梢很难保证 0.3 mg/L 的余氯,可以采用高浓度消毒剂冲洗管道的措施减少管壁上的铁细菌,冲洗后管壁上铁细菌浓度可降低 99% 以上.随着运行时间增加,管壁铁细菌会重新恢复生长,因此需要定期进行冲洗.

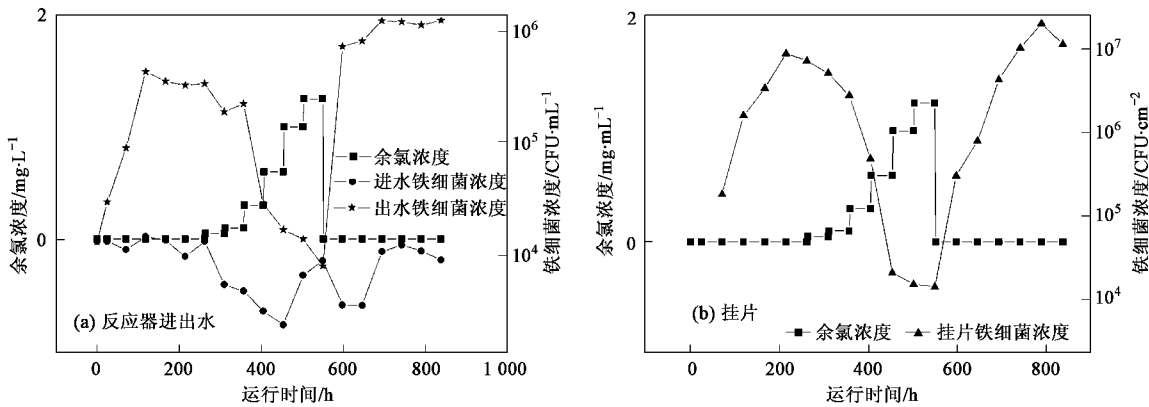


图 6 变化余氯条件下反应器进出水和挂片上铁细菌变化情况

Fig.6 Iron bacteria levels of influent, effluent and attached with chlorine residual variation

2.4 管壁铁细菌与悬浮铁细菌的数量关系

在实际管网中管壁铁细菌数量较难获得,如果得到悬浮铁细菌和管壁铁细菌的关系,则可通过检测水中悬浮铁细菌的数量,从而推测管壁铁细菌的数量,对管壁微生物腐蚀开展研究.

根据物料守恒原则,对于 AR 反应器在稳定状态下附着铁细菌脱落建立模型.模型建立的基本假设如下:①AR 反应器可以近似为一个全混流的反应器,即每一时刻出水中悬浮铁细菌的数量与反应器中悬浮铁细菌的数量相等;②悬浮铁细菌与挂片上附着的铁细菌存在相互转化.

AR 反应器中悬浮铁细菌数量的变化主要由 4 个方面引起:①进出水中悬浮铁细菌浓度的变化;②AR 反应器中悬浮铁细菌自身的生长、繁殖;③挂片上附着铁细菌的脱落;④水中悬浮铁细菌附着在挂

片表面转化成管壁铁细菌.对反应器进行物料衡算可得式(1).

$$V \frac{dX_{fe}}{dt} = Q(X_{fi} - X_{fe}) + R_a + R_d + R_p \quad (1)$$

式中, Q 为反应器进水量(mL/h); X_{fi} 为进水中悬浮铁细菌量(CFU/mL); X_{fe} 为出水中的悬浮铁细菌量(CFU/mL); R_a 为悬浮铁细菌附着速率 [$\text{CFU}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$]; R_d 为管壁铁细菌脱落速率 [$\text{CFU}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$]; R_p 为水中悬浮铁细菌的增长率 [$\text{CFU}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$].

目前国内外对于悬浮菌附着动力学过程的描述均采用一级动力学模型^[21]. k_{fa} 表示悬浮菌附着速率常数, R 表示反应器有效体积与有效附着面积的比值, A 表示反应器中挂片有效附着面积(cm^2), 则有:

$$R_a = k_{fa} \cdot X_{fe} \cdot A \cdot R \quad (2)$$

管壁铁细菌的脱落采用 n 级动力学过程表示, k_{bd} 表示铁细菌的脱落速率常数, X_a 为管壁铁细菌数量 (CFU/cm²). n 表示脱落过程为 n 级动力学过程, 则有:

$$R_d = k_{bd} \cdot X_a^n \cdot A \tag{3}$$

悬浮铁细菌的增长 R_p 可以表示为:

$$R_p = \mu X_{fe} \cdot V \tag{4}$$

式中, μ 表示悬浮铁细菌在反应器内生长繁殖的比增长速率常数(h⁻¹), V 为反应器有效容积(mL).

代入式(1), 则得到:

$$V \frac{dX_{fe}}{dt} = Q(X_{fi} - X_{fe}) + \mu \cdot X_{fe} \cdot V + k_{bd} \cdot X_a^n \cdot A - k_{fa} \cdot X_{fe} \cdot A \cdot R \tag{5}$$

在铁细菌达到稳定生长后, 反应器中悬浮铁细菌的数量, 以及挂片上铁细菌的数量均保持不变, 因此有:

$$V \frac{dX_{fe}}{dt} = Q(X_{fi} - X_{fe}) + \mu \cdot X_{fe} \cdot V + k_{bd} \cdot X_a^n \cdot A - k_{fa} \cdot X_{fe} \cdot A \cdot R = 0 \tag{6}$$

考虑到反应器进水悬浮铁菌量大约比出水小一个数量级, 即 $X_{fi} = 0.1 X_{fe}$. 由于反应器水力停留时间仅为 1 h, $\mu \cdot X_{fe} \cdot V \ll R_d$. 由此也可以说明, 此时水中悬浮铁细菌重要来源于挂片上附着铁细菌的脱落, 而不是悬浮铁细菌自身的增长, 即 $\mu \cdot X_{fe} \cdot V \ll R_d$. 因此式(6)最终可以化简为:

$$X_{fe} = \frac{k_{bd} \cdot X_a^n}{0.9QA + k_{fa} \cdot R} \tag{7}$$

选取同一剪切力条件稳定生长状态下, 悬浮铁细菌与管壁附着铁细菌数量关系按照式(7)进行拟合, 结果见图 7. 挂片上铁细菌的脱落满足一级动力学过程, 即 $n = 1$. 在稳定的条件下, 水中悬浮的铁细菌与挂片上铁细菌之间存在着线形的关系. 由于 AR

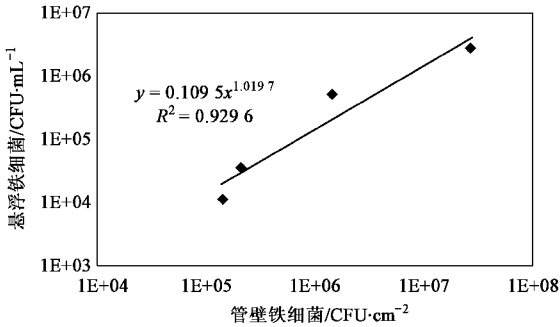


图 7 悬浮铁细菌数量与管壁附着铁细菌数量关系
Fig.7 Correlation between suspended and attached iron bacteria levels

作为一种 CSTR 反应器, 仅能模拟实际管网中某一特定管段, 在特定条件(一定剪切力、一定营养基质条件等)下的情况. 在实际管网中, 两者之间关系的表达式也更加复杂, 需要结合具体的参数得到, 因此还需对此进行进一步的研究.

3 结论

(1)管壁铁细菌在反应器运行 12 d 后达到稳定生长, 出水中铁细菌数量比进水增加 1 lg.

(2)较大的剪切力使挂片上铁细菌生长达到稳定需要的时间变长. 不同的剪切力对于达到稳定生长后的挂片上的铁细菌数量没有明显的影响.

(3)稳定余氯 0.3 mg/L 可以有效控制悬浮和管壁铁细菌的生长, 数量降低 1 lg; 对于管垢内的铁细菌即使余氯增加到 1.0 mg/L 仍无法杀灭;《生活饮用水卫生标准 GB 5749-2006》中规定的管网末梢余氯浓度 0.05 mg/L 无法有效控制悬浮和管壁附着铁细菌的生长. 对于稳定生长下的管壁铁细菌, 增加余氯浓度至 1.25 mg/L, 可使管壁铁细菌数量降低 2 lg ~ 3 lg.

(4)稳定状态下, 悬浮铁细菌与管壁铁细菌数量具有线性关系, 在实际管网运行中, 可以通过监测悬浮铁细菌的数量推测出管壁铁细菌数量, 从而对管网腐蚀开展研究.

(5)可以通过以下措施控制给水管网铁细菌生长: 维持管网余氯 0.3 mg/L; 定期采用较高浓度消毒剂冲洗管道; 采用新型防腐管材或加快旧管网改造, 提高管网抗腐蚀性能等.

参考文献:

[1] 李欣, 王郁萍. 给水管材材质对供水水质的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(5): 592-595.
[2] 曹帮卿, 韩建秀, 孙昊. 城市供水管网系统水质二次污染的原因及防治对策[J]. 南阳师范学院学报, 2003, 2(6): 58-60.
[3] 罗昊进, 谭立国. 城市供水管网选材与水质污染分析[J]. 净水技术, 2005, 24(6): 68-70.
[4] 袁志彬, 王占生. 城市供水管网水质污染的防治研究[J]. 天津建设科技, 2003, 2: 30-31.
[5] Cloete T E, Brozel V. Biofouling: chemical control of biofouling in water systems [J]. Encyclopedia of Environmental Microbiology, 2002, 2: 601-609.
[6] Ridgwat H F, Means E G, Olson B H. Iron Bacteria in Drinking-Water Distribution Systems: Elemental Analysis of *Gallionella* Stalks, Using X-Ray Energy-Dispersive Microanalysis [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1981, 47(1): 288-297.
[7] Chamtiyski I G, Burns G R, Laycock N J. Effect of iron-oxidizing bacteria on pitting of stainless steel [J]. Corrosion, 2004, 6: 658-

669.

[8] 王洋,牛璋彬,张晓健,等. 某市给水管网铁细菌生长特征调查[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(1): 34-38.

[9] 袁一星,赵明. 供水管网内锈垢的成因及危害[J]. 中国给水排水, 1998, **14**(6): 29-30.

[10] Edstrom Industries. Iron and Iron Bacteria in Water[EB/OL]. <http://www.edstrom.com>. 2003.

[11] Eaton A D, Clesceri L S, Greenberg A E. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. (19th Edition) Washington DC: American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 1995. 9-75.

[12] 霍洛得尼•H•R 著,王祖农,译. 铁细菌[M]. 北京:科学出版社,1957.94-115.

[13] 许保玖. 给水处理理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000. 701-703.

[14] Cotstjens P L, de Vrind J P, Westbroek P, *et al*. Enzymatic iron oxidation by *Leptothrix discophora*: identification of an iron-oxidizing protein [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, **58** (2):450-454.

[15] Adams L F, Chiorse W C. Physiology and ultrastructure of *Leptothrix discophora* SS-1 [J]. Archives of Microbiology, 1986, **145**: 126-135.

[16] GB/T 18175-2000. 水处理剂缓蚀性能的测定 旋转挂片法[S].

[17] Emerson D, Chiorse W C. Isolation, cultural maintenance, and taxonomy of a sheath-forming strain of *Leptothrix discophora* and characterization of manganese-oxidizing activity associated with the sheath [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, **58** (12): 4001-4010.

[18] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].

[19] 牛璋彬. 给水管网铁稳定的化学性控制特性研究[D]. 北京:清华大学, 2008. 89-90.

[20] 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, 2005. 76-79.

[21] Wanner O. Multispecies biofilm model [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1986, **28**(3):314-328.