

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.12.2016042001

付军, 周斌, 滕曼. 含氯胺水管网输配过程中红水现象的产生机理[J]. 环境化学, 2016, 35(12): 2575-2581.

FU Jun, ZHOU Bin, TENG Man. Study on the mechanism of red water phenomenon during drinking water distribution by chloramination disinfection[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(12): 2575-2581.

含氯胺水管网输配过程中红水现象的产生机理*

付军¹ 周斌² 滕曼^{3**}

(1. 中日友好环境保护中心, 北京, 100029; 2. 中国21世纪议程管理中心, 北京, 100038;
3. 中国环境监测总站, 北京, 100012)

摘要 以北方某城市区域管网为研究对象, 考察了该区域管网管材分布情况及氯胺消毒水的水质变化特征. 结果显示, 该区域管网水质稳定, 二次消毒剂氯胺衰减动力学符合氯胺自身降解的二级动力学过程, 说明该区域干管输送过程对水质指标影响不大, 红水现象主要来自于户线管网. 通过旧管道输水模拟实验, 对该市因变更水源导致红水现象的过程和机理进行了分析, 结果表明, 氯胺对铁管材的腐蚀性比氯更强, 更能导致金属的溶出; 原水中硫酸盐升高能加剧水质对管道的腐蚀性. XRD分析表明, 发生过红水的管道 α -FeOOH的含量较少, β , γ -FeOOH的含量大于 α -FeOOH; 而没有发生过红水的管道 α -FeOOH含量明显大于 β , γ -FeOOH, α -FeOOH可能是铁质管道内壁形成致密保护层从而保持水质稳定的主要成分.

关键词 管网, 红水, 消毒, 铁溶出.

Study on the mechanism of red water phenomenon during drinking water distribution by chloramination disinfection

FU Jun¹ ZHOU Bin² TENG Man^{3**}

(1. Sino-Japan Friendship Centre for Environmental Protection, Beijing, 100029, China;
2. The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing, 100038, China;
3. China National Environmental Monitoring Center, Beijing, 100012, China)

Abstract: This paper systematically studied the water quality changes of the regional distribution system influenced by pipe materials and chloramination disinfection in a northern city in China. The results showed that the water quality of the regional distribution system was stable, and the rate of chloramine decay followed the second order kinetics which was the same as the decay mode of chloramine itself in water. It indicated that the transmission process of regional distribution system had little influence on water quality. Through the old pipeline simulation experiments in laboratory, we analyzed the process and mechanism of red water phenomenon caused by the change of water source. The corrosivity of chloramine in iron pipe was stronger than chlorine, and chloramine increased the metal dissolution in raw water. The corrosivity of raw water would be enhanced when the concentration of sulfate was increased. Via XRD analysis, the pipeline in which red water phenomenon occurred contained less α -FeOOH and more β , γ -FeOOH, while the opposite was true in the pipeline where the red water phenomenon never occurred. It was supposed that α -FeOOH

2016年4月20日收稿(Received: April 20, 2016).

* 国家自然科学基金(51508582)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51508582).

** 通讯联系人, Tel: 010-84943186, E-mail: tengman@cnemc.cn

Corresponding author, Tel: 010-84943186, E-mail: tengman@cnemc.cn

might be the main component of the dense protective layer formed on the inner wall of the iron pipe, which helped to maintain the stability of water quality.

Keywords: water distribution, red water, disinfection, iron release.

饮用水与人们的生活和健康密切相关,随着经济社会发展与人们生活水平的不断提高,人们对饮用水水质要求也越来越高.先进的饮用水处理工艺能保证出厂水水质完全符合国家标准.然而供水企业在大力提高水处理厂的水质净化能力后,目前面临的一大难题是如何在庞大的输配水管网中保持优良的水质.研究表明,即便是水质优异的出厂水,倘若其稳定性较差、未有效控制输配过程的二次污染,其水质也可能发生恶化从而对用户健康造成潜在的风险.出厂水在二次输配过程中由于受水力停留时间、管材、水源水质等诸多方面的影响发生各种复杂的物理、化学和生物反应,造成管网中的饮用水遭受二次污染.最终导致用户端出水浑浊、色度、铁含量和细菌总数超标等现象^[1-7],据统计管网水浑浊度比出厂水高出 24%—37%^[1],严重时出现红水现象^[8],因此如何提高出厂水稳定性,尽可能避免和有效控制水在管网输配过程中的“二次污染”,已成为保障安全优质饮用水供给的关键问题.

国内外曾就管网输配过程的水质稳定化和“二次污染”控制技术,进行过一定程度的研究.首先,在管网布局设计时,应布局优化,尽可能使水处于循环流动状态,避免水在管道内长期滞留发生“死水”现象.其次,在水处理过程中,考虑到管网对水质的化学稳定性和生物稳定性的要求,应尽可能采用先进的处理工艺尽可能保证出厂水的稳定性.第三,针对出厂水水质特点及市政管网规模布局,确定最适宜的消毒剂种类、投量及其组合工艺.第四,在输配水管材选取过程中,应选择针对当地水质特征的管材,尽可能减少水对管材的腐蚀而造成的水质恶化.此外,对管道及其附属设施、二次供水设施等应及时进行规范的维护,避免外部污染源进入管网系统^[9-15].

选取北方某城区供水管网水质进行了系统调查,系统考察了该区域管网管材分布情况及水质变化特征,并通过旧管道输水模拟实验及管道腐蚀内壁进行表征,对该市因变更水源导致红水现象产生的过程和机理进行分析,探讨管网出现红水的原因及机理,以为控制管网水质稳定性提供依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 实验方法

以北方某城市区域管网为研究对象,通过文献收集及供水机构现场调研的方式系统考察了该区域管网管材分布情况.研究区域水质数据通过在布设的监测点附近的消防栓处进行实际监测获取,其中一级支线长约 5 km,布设 3 个采样点,相邻两个采样点之间的距离约 1.5 km;二级支线首末设两个采样点.监测指标包括:余氯、pH、浊度、铁、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、碱度、电导率和消毒副产物等.

其中为了研究红水产生机理,对氯/氯胺、Fe、浊度等指标作了重点考察.为研究氯胺衰减动力学,还选择了一条长 13 km,管径 800 mm,管龄 5 年的输水干线进行水质沿程变化分析.此外,分别对发生严重红水和未发生红水区域的支线管材进行了内壁腐蚀层 XRD 表征.主要分析仪器与方法见表 1.

表 1 主要分析仪器与方法

Table 1 Analytical instruments and methods

测试指标 Parameter	分析方法 Method	分析仪器 Instrument
管壁腐蚀层	XRD 法	Rigaku D/max 2550V
金属元素	电感耦合等离子体发射光谱法	OPTIMA 2000
氯/氯胺	DPD 比色法	HACH UV4000
碱度	酸碱指示剂滴定法	—
浊度	光散射浊度仪法	HACH 2100N
pH	pH 计法	METTLER TOLEDO
电导率	电导率分析仪法	METTLER TOLEDO

1.2 实验装置

选取两根内径 2.5 cm、长 5 m、年限超过 15 年并采至该区域同一户线管网的旧镀锌管作为考察对象,用硅胶管、玻璃瓶及蠕动泵密封连接,进行不同水质参数下管道输水的循环模拟实验。

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 该市输配水管网类型及布局

该市主干道输配水管材主要使用铸铁管、钢管,钢管相对腐蚀严重,铸铁管分为加内衬和不加内衬两种,内衬材料主要是水泥,水泥内衬会随着使用时间的增加而变得更光滑,水泥内衬管材的管径一般在 75 mm 以上,目前该市大约有 1/3 管材无内衬,另外镀锌管分为加内衬和不加内衬两种,内衬材料为高压喷涂的环氧树脂,一般管径为 50、40、25 mm,镀锌管在 1990 年以后开始使用喷涂内衬技术,300 mm 以上管道生产均有水泥内衬,旧管道的改造方法为先高压冲洗去除管壁沉积物(主要是 CaCO_3 等混合物),然后漩涡式喷涂环氧树脂材料.新产镀锌管也分为加内衬和不加内衬两种,该市目前主干道管材使用情况如表 2 所示.需要指出的是由于户线管材种类繁多且管材使用不受供水单位控制,为此难以对其使用情况进行统计分类,但其使用种类基本与文献调研情况一致。

表 2 北方某市输水干管材质
Table 2 Material type of trunk network in the city

管材种类 Material	数量 Number/根	总长度 Length/km	管材种类 Material	数量 Number/根	总长度 Length/km
铸铁	75609	1379038.7800	球墨铸铁 X 钢	129	2380.8600
球墨铸铁	15599	384092.6700	球墨铸铁 X 铸铁	82	2293.5400
钢	14771	360005.8600	钢 X 铸铁	14	382.6600
钢管	6500	140671.7300			

2.2 该市水源变化后出厂水水质变化情况

该地区水厂更换部分水源后,对该市分布在东、南、西、北的 4 个区域的 A、B、C、D 等 4 个水厂进行了水质情况调研分析,由该地水厂进行检测,结果见表 3,通过对比可以看出水源发生变化后各出厂水总体指标稳定,硝酸盐、氯化物、浊度、溶解性固体、硬度、pH 及余氯等浓度均未发生明显变化,但 A、B、C 等 3 个水厂的碱度有所降低,4 个水厂出水硫酸盐浓度明显增加,C 水厂出水硫酸盐浓度由 $38.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到 $224 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

表 3 原水进入该市前后出厂水水质变化情况
Table 3 Characteristics of water quality

测试指标 Parameter/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	A 厂		B 厂		C 厂		D 厂	
	变化前 Before	变化后 After	变化前 Before	变化后 After	变化前 Before	变化后 After	变化前 Before	变化后 After
硝酸盐(以氮计) $\text{NO}_3\text{-N}$	6.7	5	0.9	1.2	2.3	1.9	1.9	2.3
氨氮(以氮计) $\text{NH}_3\text{-N}$	—	0.16	—	0.28	—	0.02	—	0.02
三氯甲烷 THMs($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	2.1	2.4	16.5	8.7	20.6	13.7	32.8	9.8
浑浊度 Turbidity(NTU)	0.16	0.23	0.2	0.18	0.28	0.26	0.16	0.16
氯化物 Chloride	59.7	66.3	20.7	32.7	14.7	51.4	16.6	36.2
硫酸盐 Sulfate	82	156	42.4	98.7	38.5	224	35.2	130
溶解性总固体 SS	522	570	294	302	254	500	204	394
总碱度 CaCO_3	314	195	170	120	163	120	142	140
总硬度 Alkalinity	314	329	170	197	163	280	142	241
耗氧量 COD_{Mn}	0.36	1.8	0.87	0.76	1.5	1.1	0.55	0.72
pH(无量纲)	7.54	7.63	7.57	7.81	7.95	7.72	7.93	7.76
余氯 Residual chlorine	0.65	0.8	0.7	0.8	0.6	0.55	0.6	0.6

2.3 调查区域管网水质情况

为系统研究该市管网水质变化规律,在该市北部地区选择了一个相对独立的区域进行系统考察.该区域管网规则,管龄较小,由两条管径为 600 mm 的一级干线将水供入区域内,然后由若干条管径 400 mm 的二级干线将水分配给不同小区用户,最后再由一些管径 300 mm 和 100 mm 的接户线输送到居民楼.该研究区域水质数据通过在布设的监测点附近消防栓处进行实际监测获取,其中一级支线长约 5 km,布设 3 个采样点,相邻两个采样点之间的距离约 1.5 km;二级支线上首末设两个采样点.监测指标包括:余氯、pH、浊度、铁、氨氮、硝态氮、亚硝态氮和消毒副产物等指标.水质情况见表 4,可以看出该区域管网水质稳定,各指标前后不大.

表 4 研究区域管网水质情况

Table 4 Water quality of network in study area

采样点 Site	温度 Temperature	pH	DO/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	余氯 Residual chlorine/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	浊度 Turbidity (NTU)	Fe/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	NO_3^- / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮 $\text{NH}_3\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	THMs/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	16.4	7.44	3.25	0.53	0.4127	97.51	0.85	0.076	14.44
2	16.7	7.32	4.1	0.5	0.2045	86.12	0.85	0.06	17.08
3	16.4	7.54	2.8	0.74	0.1667	55.89	0.74	0.09	19.64
4	15.8	7.45	3.53	0.77	0.2340	61.68	0.93	0.11	7.08
5	15.8	7.23	3.55	0.89	0.3955	64.43	0.87	0.18	14.81
6	15.8	7.18	3.8	0.23	0.3240	94.23	0.82	0.11	16.17
7	15.8	7.25	3.38	0.82	0.9225	126.43	0.87	0.12	14.20
8	16.9	7.25	3.55	0.57	0.3060	77.86	0.89	0.09	13.99
9	15.5	7.42	2.75	0.67	0.2880	107.39	0.78	0.08	13.71
10	15.6	7.42	3.81	0.78	0.2670	60.87	0.76	0.08	17.65
11	15.6	7.37	3.18	0.73	0.2205	35.74	1.09	0.08	12.37
12	17.8	7.18	3.58	0.51	0.1850	49.64	0.95	0.07	16.04

在该区域一条长为 15 km 的干线系统考察了氯胺的衰减动力学情况,结果如图 1 所示,可以看出氯胺沿管程衰减规律明显,经过 15 km 输送后氯胺从管端初始的 $0.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到了约 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.将数据进行拟合发现,二级动力学方程能很好地拟合氯胺的衰减规律,符合氯胺自身降解的动力学规律,一般在管材影响作用较小的情况下氯胺的衰减动力学主要决定于自身的衰减规律.这也反映了主干管输送过程稳定,对水质的影响小.

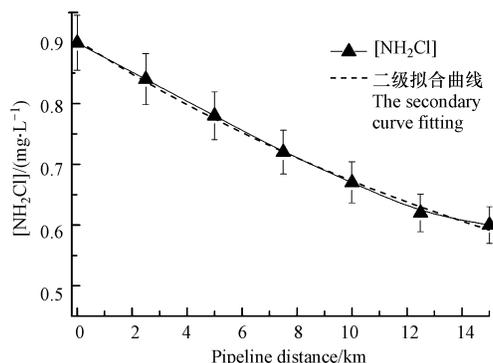


图 1 干线管网氯胺衰减动力学

Fig.1 Kinetics of chloramine decay in trunk pipe

2.4 红水现象产生的原因机理分析

管道因腐蚀产生红水现象,而管道腐蚀主要与水质、管道材料及管龄等因素相关.该市更换水源后,局部地区居民家庭自来水出现不同程度红水现象,首先,原水经过处理后虽然符合国家自来水标准,但是该市自来水管网内水体原有平衡被打破,引发部分区域自来水管材锈迹脱落,从而导致了“红水”的产生.一般以地表水为水源的自来水腐蚀性较强,例如 C 水厂 1984 年投产,到 90 年代初期,距离其水厂

不远的管道腐蚀已经相当严重.而 B 厂管网输送系统复杂,且输送距离长短不一,该市的实际管网腐蚀程度迥异.该市严重红水主要发生在原来供地下水的区域,地下水与地表水的混合供水区也有红水出现,但程度较弱,而以供地表水为主的地区基本没有发生红水现象.通过该市各水厂水源更换前后的水质对比(表 3)可以看出,水质主要变化表现为硫酸盐的增加和碱度的降低.

2.4.1 氯胺消毒对管道铁溶出的影响分析

为了研究不同水质参数对管道腐蚀的影响,通过实验室输配系统进行了模拟实验,对比考察了氯胺和氯消毒方式对比及硫酸盐对管道溶出铁的贡献.水样采自 B 水厂炭滤后水.实验前,用实验水样进行清洗,稳定 2 h 以上.清洗及实验进行过程均保证流量为 $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,即流速为 $3.3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.水样中初始氯胺和氯的投加量均为 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,实验结果如图 2 和图 3 所示,可以看出:(1)相对于氯而言,氯胺对管壁的腐蚀性更强,更能增加管壁腐蚀导致铁的溶出;(2)2 h 水力停留时间内,消毒剂基本消耗殆尽,而铁的溶出也主要发生在此时段.铁溶出的主要形态是颗粒铁,消毒剂衰竭完后铁溶出基本稳定,说明 B 水厂出水的腐蚀性小.B 厂出水用氯胺作为二次消毒剂,在滤后水中补加了 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上的氨氮.国外已经多次报道氯胺消毒致使管网中铅的溶出超过标准数百倍^[7].主要是因为氯胺能够与铅的沉积物形成溶解性物质,而目前该市红水问题已经产生,管网的稳定性已经受到影响,因此氯胺消毒更加提高了铅等重金属溶出的风险,应给予一定关注.

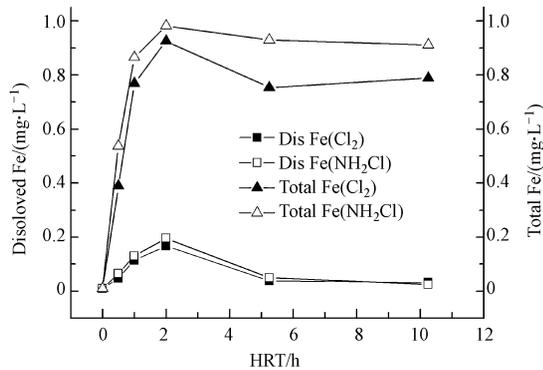


图 2 氯胺和氯消毒条件下铁的溶出形态

Fig.2 Species of dissolved iron during chloramination and chlorination

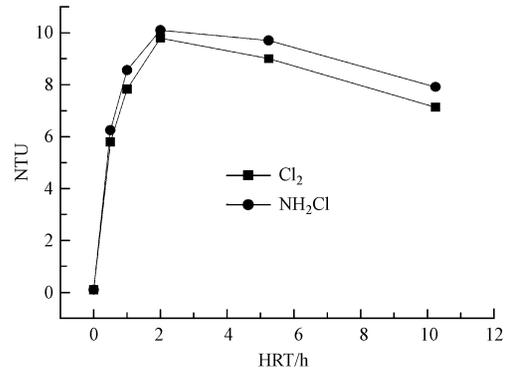


图 3 氯胺和氯消毒条件下浊度对比

Fig.3 Comparison of NTU during chloramination and chlorination

2.4.2 硫酸盐对管道铁溶出的影响分析

一般认为,pH、碱度低,溶解氧、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等离子含量高,电导率值大的水对管道的腐蚀作用大.由原水经各水厂处理前后出水水质指标可知,硫酸盐浓度增加明显.为了探明硫酸盐对“红水”现象产生是否有贡献,水样中投加 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸盐进行铁溶出对比实验,水力条件均保持不变.实验结果如图 4 所示,可以看出硫酸盐对铁的溶出作用明显.

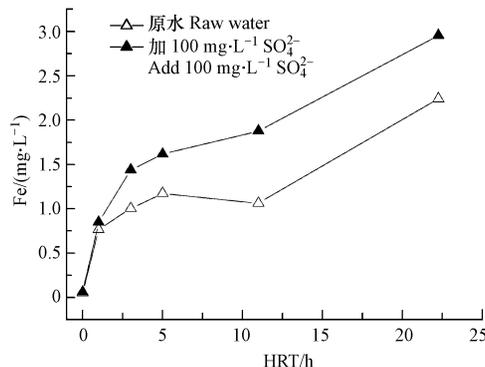


图 4 原水中硫酸盐对旧镀锌管中铁溶出的影响

Fig.4 Effect of sulphate on iron release from old galvanized pipe

运行 24h 后,未投加硫酸盐的总铁浓度为 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而投加硫酸盐的总铁浓度提高到 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,实验结果证明硫酸盐浓度过高是导致“红水”现象产生的主要原因之一。

2.4.3 管道内壁腐蚀层表征分析

分别对发生红水严重和未发生红水区域的支线管材的内壁腐蚀层进行 XRD 表征,采样表征方法如前所述,结果如图 5 所示。对比发现:(1) 腐蚀产物主要包括 α 、 γ - Fe_2O_3 、 α - FeOOH 、 β 、 γ - FeOOH 、 Fe_3O_4 、 FeCO_3 ;(2) 发生过红水的管道 α - FeOOH 的含量较少,且 β 、 γ - FeOOH 的含量大于 α - FeOOH ;而没有发生过红水的管道 α - FeOOH 含量明显大于 β 、 γ - FeOOH ,所以 α - FeOOH 可能是形成致密保护层的主要成分,长期通地表水的管道中更有利于 α - FeOOH 的形成。

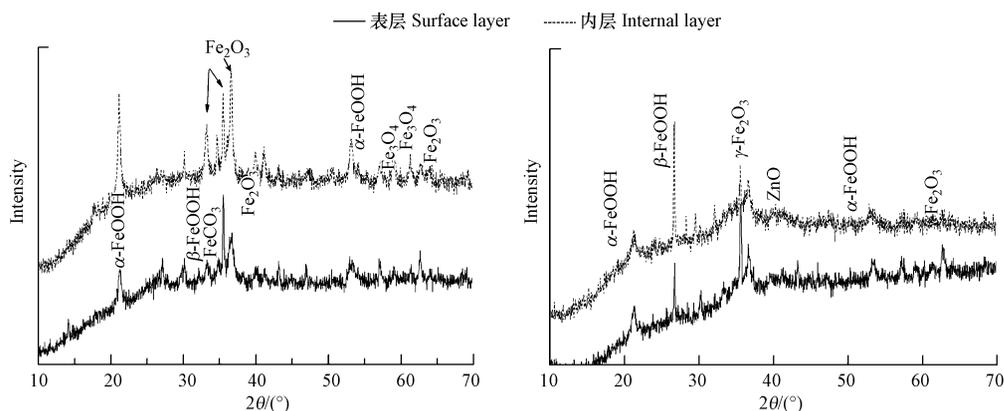


图 5 未发生和发生过红水现象的镀锌管典型的 XRD 谱图

Fig.5 XRD spectra of the galvanized pipe without and with a “red water” phenomenon

管道腐蚀是铁基体的氧化和腐蚀产物的形成过程,而红水现象产生主要由溶解态或颗粒态的铁由管壁往水相中转移而导致。研究表明,铁质管材表面腐蚀层的化学组成成分主要包括 CaCO_3 、针铁矿 (Goethite, α - FeOOH), 磁铁矿 (Magnetite, Fe_3O_4) 和纤铁矿 (Lepidocrocite, γ - FeOOH) 等结构的氧化物^[6]。由铁的基体腐蚀产生的亚铁离子的释放和腐蚀层中亚铁组分的溶解是造成水相中铁浓度升高的主要原因。铁的释放是由管壁上腐蚀氧化物层的物理化学性质控制的,并且腐蚀层的结构从外到内是不同的。在最外层主要是由三价铁氧化物(如 Fe_3O_4 、 α - FeOOH 、 γ - FeOOH) 构成,结构比较致密。而在这一致密层以下则是由亚铁氧化物为主的多孔疏松腐蚀产物,氧气或自由氯等氧化剂能够将扩散到腐蚀层表面的亚铁离子氧化成不溶性的三价铁产物从而抑制铁往水相中的释放。纤铁矿 (Lepidocrocite, γ - FeOOH) 被认为是易于还原的三价铁形态,而它通常是在亚铁离子的快速氧化条件下形成的。Larson 等的研究证实了水在管道中停滞、缺氧和温度较高的情况下最易导致“红水”现象的发生^[11-15]。综上,红水现象得机理图如图 6 所示,红水现象产生原因主要是管道表面层脱落的颗粒态铁及管道腐蚀层内部溶解释放的亚铁造成。

3 结论 (Conclusion)

北方某市某新型小区域管网非常规范,能代表该市管网水质特征。对该小区内的管网水质进行了调查。该区域管网水质稳定,各水质指标变化不大,说明该区域管网输配过程对水质影响小。同时还选择了一条独立干线进行了氯胺衰减动力学的研究。氯胺从管端浓度 $0.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到了末端的 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且能很好地用二级动力学方程拟合,符合氯胺自身衰减动力学规律,说明管壁对氯胺衰减影响小。

(1) 氯胺和氯消毒剂均对管道有腐蚀作用,氯胺对铁质管材的腐蚀性比氯更强,更能增加金属的溶出,溶出铁以颗粒态为主。

(2) 原水中硫酸盐浓度升高能明显加剧水质对管道的腐蚀性。

(3) 发生过红水的管道 α - FeOOH 的含量较少,且 β 、 γ - FeOOH 的含量大于 α - FeOOH ;而没有发生过红水的管道 α - FeOOH 含量明显大于 β 、 γ - FeOOH 。所以 α - FeOOH 可能是形成致密保护层从而保障水质

稳定的主要成分.

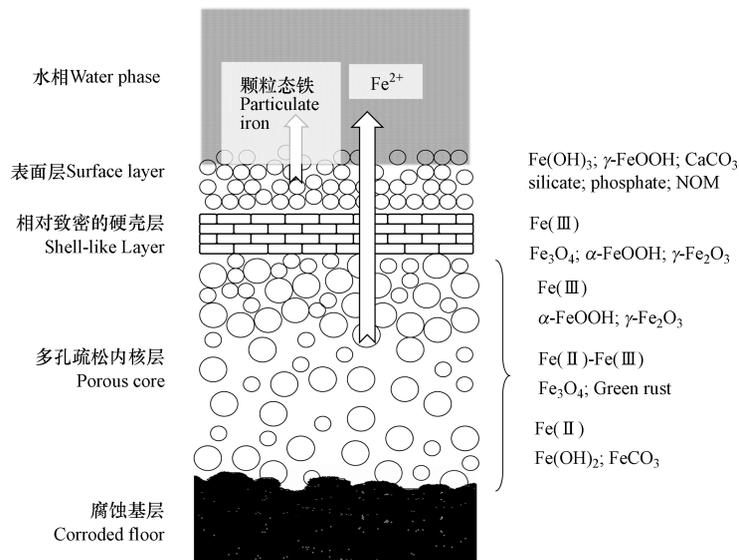


图 6 管网输配红水现象机理图

Fig.6 Mechanism of red water phenomenon during drinking water distribution

参考文献 (References)

- [1] 何维华, 齐宇, 邹一葵. 国内部分城市供水管网水质调研分析[J]. 给水排水, 1993, 19(11): 15-19.
HE W H, QI Y, ZOU Y K. Investigation and analysis on water quality of some distribution networks [J]. Water & Wastewater Engineering, 1993, 19(11): 15-19 (in Chinese).
- [2] 叶必雄, 王五一, 杨林生, 等. 二氧化氯与氯联合消毒对饮用水中消毒副产物的影响[J]. 环境化学, 2011, 30(7): 1236-1240.
YE B X, WANG W Y, YANG L S, et al. Effect of combined disinfection with chlorine and chlorine dioxide on the formation of disinfection by-products in drinking water [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(7): 1236-1240 (in Chinese).
- [3] 张晓健, 牛璋彬. 给水管网中铁稳定性问题及其研究进展[J]. 中国给水排水, 2006, 22(2): 13-16.
ZHANG X J, NIU Z B. Progress in the study of the iron stability problem in drinking water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(2): 13-16 (in Chinese).
- [4] 付军, 滕曼, 万东锦, 等. 不同管材对氯胺消毒副产物生成与水质生物稳定性的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1189-1194.
FU J, TEGN M, WAN D J, et al. Effect of pipe materials on disinfection byproduct generated by monochloramine and biological stability of water quality[J]. China Environmental Science, 2010, 30(9): 1189-1194 (in Chinese).
- [5] 尤作亮, 徐洪福, 曲志军. 配水管网中水质变化规律及主要影响因素分析[J]. 给水排水, 2005, 31(1): 21-26.
YOU Z L, XU H F, QU Z J. Study on water quality fluctuation and influencing factors in water distribution network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2005, 31(1): 21-26 (in Chinese).
- [6] SARIN P, SNOEVINK V L, BEBEE J, et al. Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes [J]. Water Research, 2001, 35(12): 2961-2969.
- [7] FU J, QU J H, LIU R P, et al. Mechanism of Cu(II)-catalyzed monochloramine decomposition in aqueous solution [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(13): 4105-4109.
- [8] 王洋, 张晓健, 陈超, 等. 水源切换引起给水管网黄水问题原因分析[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3555-3561.
WANG Y, ZHANG X J, CHEN C, et al. Case study of red water phenomenon in drinking water distribution systems caused by water source switch [J]. Environmental Science, 2009, 30(12): 3555-3561 (in Chinese).
- [9] VIKESLAND P J, OZEKIN K, VALENTINE R L. Effect of natural organic matter on monochloramine decomposition; Pathway elucidation through the use of mass and redox balances [J]. Environmental Science & Technology, 1998, 32: 1409-1416.
- [10] VIKESLAND P J, VALENTINE R L. Reaction pathways involved in the reduction of monochloramine by ferrous Iron [J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34: 83-90.
- [11] LARSON T E. Corrosion by domestic waters [R]. Bulletin 59, Illinois State Waters Survey, 1975.
- [12] LARSON T E, SKOLD R V. Corrosion and tuberculation of cast iron [J]. Journal American Water Works Association, 1957 (10): 1294-1302.
- [13] PIGSAN R A, SINGLEY J E. Evaluation of water corrosivity using the Langelier Index and relative corrosion rate models [J]. Materials Performance, 1985, 26(4): 26-36.
- [14] LIN J, ELLAWAY M, ADRIEN R. Study of corrosion material accumulated on the inner wall of steel water pipe [J]. Corrosion Science, 2001, 43, 2065-2081.
- [15] SINGLEY J E. The search for a corrosion index [J]. Journal American Water Works Association, 1981, 73(10): 529.