

技术总结

城市供水管网通水初期水质变化规律研究

刘东坡^{1,2}, 张金松^{1,2}, 靳军涛^{1,3}

(1. 深圳市水务<集团>有限公司, 广东 深圳 518035; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 3. 清华-京大环境技术联合研究与教育中心, 广东 深圳 518055)

摘要: 针对城市供水管网通水初期水质不稳定引起客户投诉的问题,以球墨铸铁管、不锈钢管和 HDPE 管为研究对象,以南方某水厂的出厂水为进水,模拟了供水管网通水初期的运行情况。通过监测管道内水质、颗粒物粒径分布及管垢组分,对比分析了3种管材运行过程中水质及管壁界面的变化和交互作用特征。结果表明,球墨铸铁管运行过程中水质变化最大,pH值始终高于8.0、色度最高达到10度、余氯衰减明显,而不锈钢管和 HDPE 管各项水质参数运行前期变化较大,后期逐渐趋于稳定。管道内壁扫描电镜和能量质谱仪测试结果表明,各管段内壁微观形貌和元素组成有显著性差异,球墨铸铁管内部微观形貌在运行期间由疏松多孔的颗粒状逐渐变为相对致密的不规则立体状,且 O、Ca 含量最多;运行14 d 时不锈钢管内壁出现大小不均的瘤状物,25 d 时内壁光滑且瘤状物减少,元素组成以 Fe、Cr 为主;HDPE 管运行前内壁有细小的穿孔,运行14 d 时穿孔明显变大,25 d 时表面粗糙呈鳞片状,元素组成以 C、O 为主。

关键词: 城市供水管网; 通水初期; 水质变化; 管道更新; 管材; 管壁腐蚀

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0043-07

Water Quality Variation in Initial Stage of Urban Water Supply Network

LIU Dong-po^{1,2}, ZHANG Jin-song^{1,2}, JIN Jun-tao^{1,3}

(1. Shenzhen Water <Group> Co. Ltd., Shenzhen 518035, China; 2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. Cooperative Research and Education Center for Environmental Technology, Tsinghua University and Kyoto University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To investigate the fluctuation of water quality after new water mains were put into service, ductile iron pipe, stainless steel pipe and HDPE pipe were used as water mains in a continuous simulation to transfer effluent from a waterworks in southern China. Through monitoring the water quality parameters, particle size distributions and scale components, the variation of the water quality and the inner wall of the pipelines, as well as the interactions between water and pipe, were analyzed and compared. The results showed that the pH value was always higher than 8.0 for the ductile iron pipe, the color was up to 10 degrees, and the residual chlorine decreased significantly. For the stainless steel pipe and the HDPE pipe, the water quality parameters were changed considerably in early stage, and were

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07501002)

通信作者: 靳军涛 E-mail: jinjuntao@tsinghua.org.cn

gradually stabilized later. Analyses of the inner wall with scanning electron microscope and energy dispersive spectroscopy revealed significant differences in the micro-morphology and elemental composition of the three pipe materials. The micro-morphology of the ductile iron pipe gradually changed from loose porous granular to relatively dense irregular surface during the operation, O and Ca were the main elements. The micro-morphology of stainless steel pipe showed uneven tubercles on the 14th day, but showed smooth wall and less tubercle on the 25th day, and its main elements were Fe and Cr. HDPE pipe had small perforations before the tests, and the perforations were enlarged on the 14th day, the surface became rough and scaly on the 25th day, and its main elements were C and O.

Key words: urban water supply network; initial stage of water conveyance; variation in water quality; pipeline update; pipe material; pipe wall corrosion

南方某市为改善供水水质,将老旧管网更换为新型管材的管道。新管道通水初期,用户投诉自来水发黄、异味等问题较多,该阶段一般采取冲洗、加氯消毒等措施保障新管材通水后的水质安全。实际操作过程中有效的冲洗和消毒需要根据水质变化规律确定时间和强度。基于此,笔者研究了新管道通水初期的水质变化规律,以指导新管道通水后水质保障措施的有效应用。

目前,该市管道改造过程中主要使用的管材包括球墨铸铁管、不锈钢管和 HDPE 管。本研究以上述 3 种管材为对象,通过实验室模拟,对新管道通水后 25 d 内各种管材出水的水质指标变化情况进行分析,并采用扫描电子显微镜 (SEM)、能量质谱 (EDS) 等方法对不同管材管道的内壁特征进行表征,分析新管道的水质变化规律以及稳定时间,旨在为城市供水管网新管道通水初期的水质保障措施的提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行条件

管段模拟反应器如图 1 所示。试验采用新的 DN150 球墨铸铁管、不锈钢管和 HDPE 管,通过车床加工成 150 mm 长的管段,管段的切口截面用环氧树脂包封以避免与水接触。装入反应器后,用自来水缓慢冲洗 30 min,以检验装置是否漏水。另外,将每种管材内壁材料切成若干个 10 mm × 10 mm 的小片,切口处用环氧树脂包裹,放入各装置的底部。试验开始后,管段内加满试验用水,利用聚乙烯搅拌桨对水体进行搅拌,以横向环流来模拟实际管网中的纵向水流流动条件,模拟试验用水与管壁之间的接触作用^[1]。

水力停留时间的选取一般有两种方式:①尽量

模拟实际的水力停留时间^[2-4];②由于新管道物化反应慢,为快速识别问题,采用最不利条件的工况进行模拟^[5-7]。笔者在水力模型的基础上对水力停留时间进行了计算,正常情况下水力停留时间为 8 ~ 12 h,最极端条件下水力停留时间为 27 h,同时对用户投诉情况统计发现,在新管道通水后 20 ~ 30 d 水质问题最为严重,因此选取水力停留时间为 24 h、运行时间为 25 d 的试验工况条件进行研究。运行前以及运行第 14 和 25 天分别取两个管道内壁小片进行 SEM 和 EDS 检测。

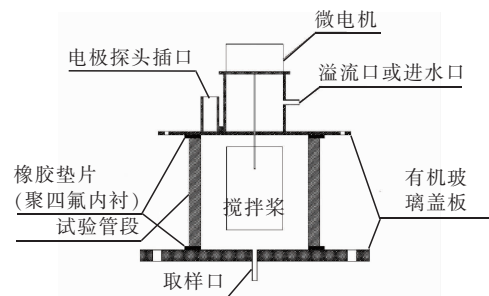


图1 管段模拟反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of pipe section simulation reactor

1.2 试验用水及监测指标

试验用水为该市某水厂出厂水,水质指标如表 1 所示。可知,水质指标满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)及该市水质标准。

pH 值采用 HACH GQ II d pH 计测定;色度采用 XINRUI SD9012AB 水质色度仪测定;浊度采用 HACH 2100AN 型台式浊度仪测定;余氯、总氯采用 HACH PC II 单参数比色计测定;总有机碳 (TOC) 采用 GE Sievers TOC 分析仪测定;Zeta 电位、电导率、颗粒物粒径分布采用 Zetasizer Nano ZEN3600 分析仪测定。

表1 试验用水水质及标准限值

Tab.1 Test water quality and standard limits

项 目	进水	国家标准	该市标准
pH 值	7.4 ~ 7.96	6.5 ~ 8.5	7.0 ~ 8.5
色度/度	0 ~ 1.6	15	10
浊度/NTU	0.126 ~ 0.378	1	0.5
余氯/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.56 ~ 0.85	≥ 0.3 (出厂水余量) ≥ 0.05 (管网末梢水)	≥ 0.3 (出厂水余量) ≥ 0.05 (管网末梢水)
总氯/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.62 ~ 0.96	≥ 0.5 (出厂水余量) ≥ 0.05 (管网末梢水)	
TOC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.93 ~ 1.19	5	3
Zeta 电位/ mV	-16.1 ~ -6.85		
电导率/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	0.132 ~ 0.147		
粒径/nm	0 ~ 200		

2 结果与讨论

2.1 水质变化

试验过程中主要水质指标的变化情况见图2。运行过程中,球墨铸铁管色度上升显著,始终高于不锈钢管和 HDPE 管,最高可达到 10 度,不锈钢管和 HDPE 管中色度也有上升,但是基本都维持在 4 度以内。

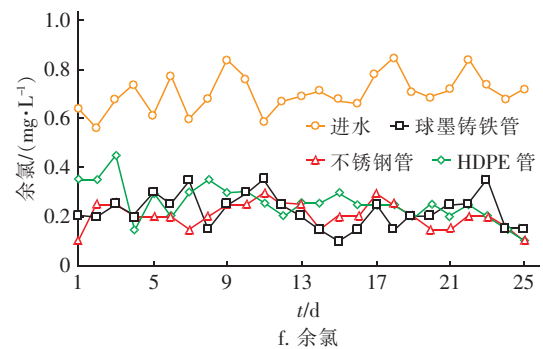
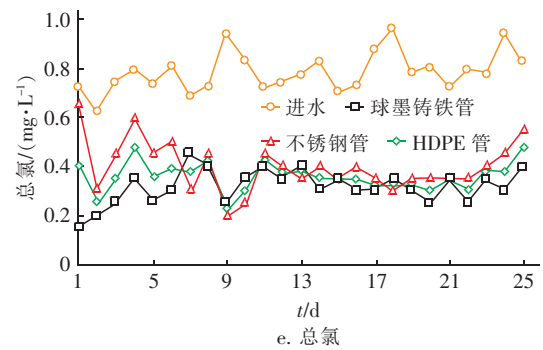
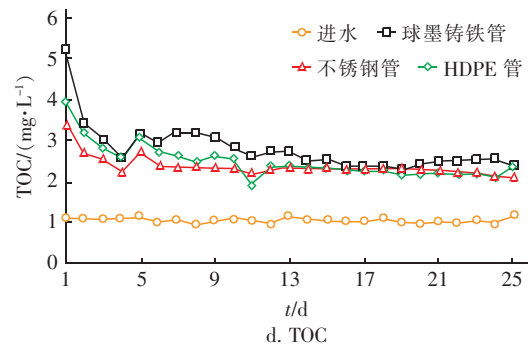
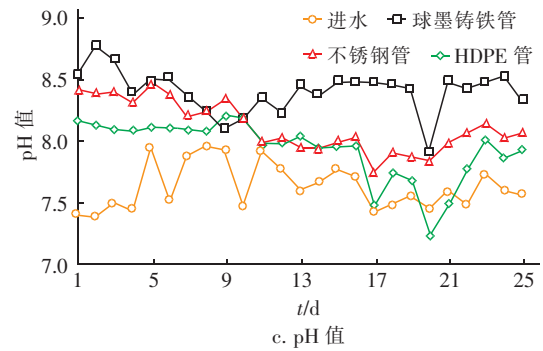
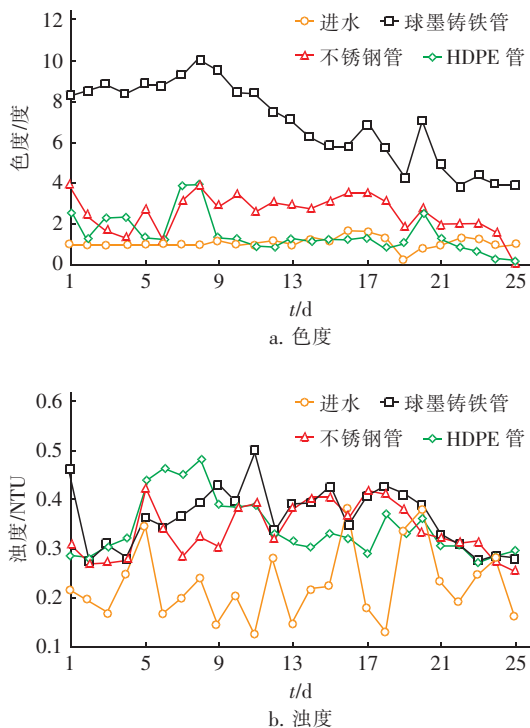


图2 装置运行期间水质指标随时间的变化

Fig.2 Variation of water quality with time

浊度、pH 值、TOC 同样呈现上升趋势。球墨铸铁管内水体浊度不稳定,变化范围在 0.27 ~ 0.51 NTU,而不锈钢管维持在 0.25 ~ 0.42 NTU 之间,HDPE 管基本在 0.27 ~ 0.48 NTU。pH 值方面,球墨铸铁管内水体 pH 值几乎始终高于 8.0,最高可达到

8.79, 不锈钢管和 HDPE 管内水体 pH 值增幅始终在 1 以内, 运行后期不锈钢管和 HDPE 管内水体 pH 值维持在 8.0 左右。3 种管材的 TOC 变化情况相似, 运行初期浓度较高, 后期逐渐降低并趋于稳定。相反地, 呈衰减趋势的主要是总氯和余氯, 总氯的衰减程度较明显, 且有球墨铸铁管 > HDPE 管 > 不锈钢管。

水质的变化与管道材质、管道表面微生物生长等多种界面因素有关。球墨铸铁管内衬含有铁铝酸四钙($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)及其他碱性物质, 这些物质溶出过程中产生 Fe^{3+} 、 OH^- , 引起色度、浊度及 pH 值升高^[8]; 不锈钢管释放的相关物质较少, 因此升高幅度较球墨铸铁管小; HDPE 管则不含该类物质, 故变化幅度最小。余氯及 TOC 的变化与管壁表面微生物的生长有关, 球墨铸铁管内衬的比表面积大, 为微生物提供了更多的栖息场所, 微生物的快速生长消耗余氯; 而不锈钢管及 HDPE 管表面光滑, 微生物生长较慢, 降低了余氯的衰减速率。TOC 的变化可能在于, 初始阶段微生物快速繁殖, 消耗有机物的同时, 被杀灭和自然死亡的微生物向水中释放, 使 TOC 浓度有所增加, 稳定后期细菌数量逐渐减少且部分有机物被余氯反应所消耗, 导致出水 TOC 降低但仍高于进水^[9-12]。李晓敏等认为, 球墨铸铁管水泥砂浆内衬中砂附着的胡敏酸和富里酸等腐殖质类有机物的溶出也是 TOC 升高的因素之一^[8]。运行前期 HDPE 管的 TOC 浓度升高, 与其管材内的有机物(烷基酚、酯、醛和酮)溶出有关^[13-15]。

2.2 颗粒物变化

图 3 为运行 25 d 时出厂水和 3 种管材管段内颗粒物粒径分布。

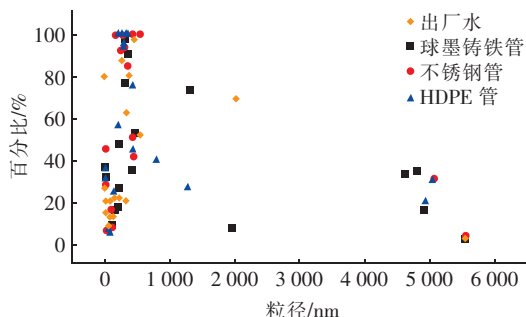


图 3 出厂水和 3 种管材管道内颗粒物粒径分布

Fig. 3 Particulate size distribution of finished water and three pipeline water

由图 3 可知, 出厂水杂质较少, 小粒径颗粒物含

量更为显著, 主要集中在 0 ~ 200 nm, 粒径为 400 ~ 600 nm 的颗粒物含量相对较少; 球墨铸铁管和不锈钢管内水体大粒径颗粒物有所增加, 主要集中在 200 ~ 600 nm, 且 400 nm 处分布更集中, HDPE 管内颗粒物粒径相对出厂水基本没有明显变化。国内外的一些研究表明悬浮颗粒物是引起水体表观污染的最主要原因, 水体颜色取决于水中颗粒物的含量和组成^[16-20]。本研究中 3 种管材的颗粒物粒径分布与色度变化相一致, 粒径越大则色度变化越显著。

2.3 Zeta 电位和电导率

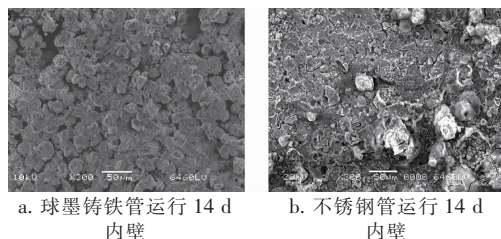
Zeta 电位是表征胶体体系稳定性的重要指标, 颗粒带电荷数的绝对值越大, 颗粒间排斥力越大, 整个体系的稳定性越高; 反之, 它们会相互吸引, 使整个体系不稳定。电导率表征水中溶解性矿物质的含量, 电导率越低, 水越纯净。考察了 3 种管材运行第 6 ~ 25 天 Zeta 电位和电导率的变化情况。结果表明, 内衬球墨铸铁管的 Zeta 电位从初期 -15.1 mV 逐渐降低后维持在 -18 mV, 电导率从初期的 0.166 mS/cm 逐渐降低后维持在 0.152 mS/cm; 不锈钢管运行过程中 Zeta 电位比较稳定, 一直维持在 -15 mV 左右, HDPE 管的 Zeta 电位初期达到 -19.1 mV, 后期逐渐升高并维持在 -13 mV, 不锈钢管和 HDPE 管的电导率与进水差别不大, 基本维持在 0.14 mS/cm 左右。Zeta 电位绝对值的大小与溶液中盐类含量有关, 研究发现, 球墨铸铁管内衬中钙离子溶出与电导率有明显的相关性, 因此球墨铸铁管内衬物溶出也是其 Zeta 电位绝对值和电导率较高的因素之一^[21-22]。

2.4 管道内表面管垢特征

为了进一步了解 3 种管材运行过程中管道内壁腐蚀特征, 在运行开始前、运行 14 d 和运行结束从各装置内取两个小片, 对管道内壁进行 SEM 和 EDS 分析, 探究各管道内壁微观结构和元素组成。

2.4.1 各管材内壁的微观形态分析

3 种管材运行过程中内壁腐蚀状况具有代表性的 SEM 照片如图 4 所示。



a. 球墨铸铁管运行 14 d 内壁

b. 不锈钢管运行 14 d 内壁

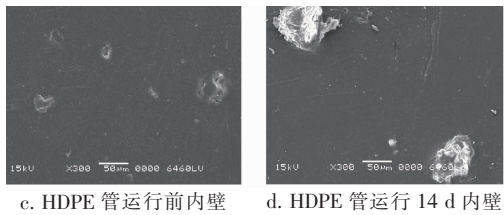


图 4 3 种管材内壁微观结构的 SEM 照片

Fig. 4 SEM micrographs of inner wall of three kinds of pipes

从图 4 可以明显看出,不同管材在运行过程中内壁腐蚀状况有着显著差异。球墨铸铁管内壁微观结构在运行前呈疏松多孔的颗粒状,14 d 时出现相对致密的不规则立体状[见图 4(a)],后期更为显著;不锈钢管运行前内壁有疏松多孔的纹理,14 d 时可以看到明显的大小不均匀的腐蚀瘤[见图 4(b)],25 d 后腐蚀瘤明显减少,内壁光滑致密;HDPE

管运行前[见图 4(c)]和运行 14 d 时[见图 4(d)]的内壁光滑,运行前期局部有明显点状小孔,14 d 时穿孔明显增大,内壁破坏加剧,25 d 时内壁粗糙呈紧凑的鳞片状。

2.4.2 管材内壁元素组成

在运行前、运行 14 d 和运行结束时,采用 EDS 测定 3 种管材管道内壁物质的元素组成(原子数百分比)。各管段在有显著变化部位进行了多次测定,选取代表性数据与 SEM 图片进行对照分析,结果见表 2。各管段内壁物质的元素组成是由管段内壁材料 and 水的物理化学参数共同决定的^[23]。由表 2 可以明显发现,同一材质的管道内壁元素组成在各阶段表现基本一致,且腐蚀(穿孔)部位比完好部位更显著;而在不同的管材管段中,内壁物质元素组成具有显著差别。

表 2 3 种管材内壁物质元素组成

Tab. 2 Element composition of inner wall of three kinds of pipes

项 目	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Ti	Ni	Mn	F	Cr	Cl
LDI(0)	3.80	45.51	0.94	1.89	1.56	4.73	0.35	2.19	36	3.04	—	—	—	—	—	—
LDI 腐蚀	4.48	49.11	—	0.49	0.59	1.28	0.29	—	42.75	1.01	—	—	—	—	—	—
(14) 完好	9.08	43.40	—	0.56	0.60	12.33	—	—	30.56	0.57	2.90	—	—	—	—	—
LDI 腐蚀	5.77	45.42	—	1.47	1.87	5.61	0.23	0.75	36.03	2.86	0	—	—	—	—	—
(25) 完好	4.10	44.18	—	0.52	0.56	1.89	—	—	47.12	1.63	—	—	—	—	—	—
SS(0)	—	2.62	—	—	—	0.42	—	—	—	71.11	—	8.62	—	—	17.22	—
SS 腐蚀	—	8.62	—	—	—	0.70	—	—	—	66.61	—	6.89	1.13	—	16.05	—
(14) 完好	—	5.11	—	—	—	—	—	—	—	66.58	—	8.78	—	—	19.53	—
SS 腐蚀	—	11.62	—	—	—	0.67	—	—	—	68.16	—	5.35	—	—	14.19	—
(25) 完好	—	3.67	—	—	—	0.62	—	—	—	70.15	—	8.54	—	—	17.02	—
HDPE 穿孔	77.24	13.11	1.64	—	0.36	0.65	—	1.30	2.58	1.10	—	—	—	—	—	2.02
(0) 完好	66.88	20.02	1.55	—	1.41	1.77	0.16	0.96	4.51	2.03	—	—	—	—	—	0.71
HDPE 穿孔	52.75	17.67	—	—	—	23.39	1.94	—	1.23	—	1.59	—	—	—	—	1.44
(14) 完好	70.53	15.94	—	—	0.20	6.05	—	—	3.83	1.65	1.51	—	—	—	—	0.30
HDPE 穿孔	72.47	16.77	—	—	0.40	5.93	—	0.26	1.22	0.90	1.70	—	—	—	—	0.36
(25) 完好	49.18	24.42	—	—	0.24	14.58	—	—	0.88	0.93	2.79	—	—	6.38	—	0.61

注: LDI(0)、LDI(14)、LDI(25)分别表示内衬球墨铸铁管运行前、运行第 14 天和第 25 天,其他管材表示方法类似;“—”表示未检测出。

球墨铸铁管内壁物质组成中,O、Ca 是主要组成元素,然后是 Si、C、Fe、Mg、Al,这与内衬材料的主要组成物质是氢氧化钙和水化硅酸钙有关,从表 2 可以明显看出,Si 的含量随着运行时间的增加而增加,Tong 等^[24]认为这是由于水泥砂浆涂层由于浸泡时间延长而变软溶出造成的;不锈钢管内壁物质元素组成相对较少,Fe 和 Cr 是不锈钢管材的主要成分,Ni、O、Si 含量相对较少,14 d 的腐蚀部位检测出了微量的 Mn,其中 O 含量随运行时间的延长而增

加,腐蚀部位比较显著;HDPE 管是有机管材,C、O 含量较高,Si、Ca、Cl、Fe、Al 次之;在 3 种管材中,其他小部分不同的元素组成是由管道自身管材差异造成的。此外,3 种管材中 Fe 和 O 两种元素含量有明显差异,球墨铸铁管、不锈钢管和 HDPE 管分别为 43.97% ~ 50.12%、71.69% ~ 79.78%、14.21% ~ 25.35%,可见管材对管道内壁的元素组成影响较大。

3 结论

① 管道通水后 25 d 内,球墨铸铁管内水质变

化最显著,其中色度在运行8 d时最高达到10度,后期有所降低但仍保持在4度左右,浊度、pH值和TOC也呈上升趋势,总氯和余氯则显著降低,电导率始终在0.15 mS/cm以上;不锈钢管和HDPE管内水质参数变化一致,运行初期变化较大,后期逐渐趋于稳定。

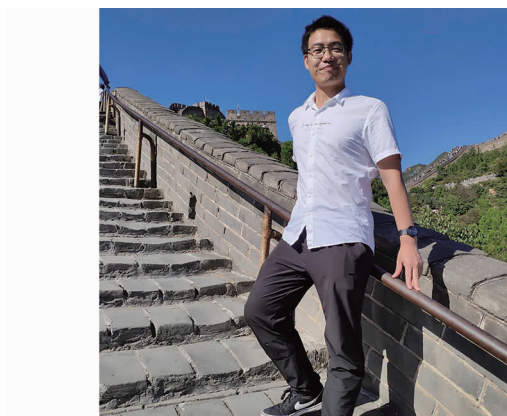
② 管材内壁微观结构有显著差异,球墨铸铁管从疏松多孔的颗粒状变为相对致密的不规则立体状;不锈钢管内壁前期呈疏松的纹理状,中后期出现明显的大小不均匀球状物;HDPE管内壁初期光滑但有小穿孔,中后期穿孔明显增大,后期表面粗糙呈鳞片状。

③ 管材内壁物质的元素组成因其材料不同而相差较大,同种材料的管段内壁元素组成在运行过程中基本一致。球墨铸铁管内壁元素中O、Ca含量最多,不锈钢管内壁元素中Fe、Cr含量最多,HDPE管内壁元素中C、O含量最高;管材对球墨铸铁管、不锈钢管和HDPE管中Fe和O含量影响较大,3种管材中含量分别为43.97%~50.12%、71.69%~79.78%、14.21%~25.35%。

参考文献:

- [1] 米子龙,张晓健,陈超,等. 淡化海水进入市政供水管网的铁稳定性[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2014, 54(10): 1333-1338.
- Mi Zilong, Zhang Xiaojian, Chen Chao, *et al.* Iron stability in desalinated seawater in municipal drinking water distribution systems [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2014, 54(10): 1333-1338 (in Chinese).
- [2] 米子龙, 郭慧婷, 张晓健, 等. 低pH低碱度水源水引起供水管网黄水的控制措施[J]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 23-27.
- Mi Zilong, Wu Huiting, Zhang Xiaojian, *et al.* Control measures for red water problem caused by low pH and low alkalinity source water in drinking water distribution systems [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(18): 23-27 (in Chinese).
- [3] Mi Z L, Zhang X J, Chen C. Iron release in drinking water distribution systems by feeding desalinated seawater: characteristics and control [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(21): 1-8.
- [4] 高玖蓁. 供水管道铁释放现象影响因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Gao Jiuli. Research of Influencing Factors on Iron Release in Water Distribution System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese).
- [5] 王立友. 典型供水金属管材电化学腐蚀及对水质影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Wang Liyou. Electrochemical Corrosion of Typical Water Supply Metal Pipe and the Impact on Water Quality [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [6] 王刚亮. 水源切换条件下水管网铁释放控制的中试研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2014.
- Wang Gangliang. Pilot Study on Iron Release Control in Drinking Water Distribution System under Source Water Switch [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2014 (in Chinese).
- [7] 唐敏. 水源切换条件下管网腐蚀研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2013.
- Tang Min. Study of Corrosion in Drinking Water Distribution System under Water Source Switch [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2013 (in Chinese).
- [8] 李晓敏, 汪隼, 陈超, 等. 淡化海水进入水泥砂浆内衬管后的水质化学稳定性[J]. 中国给水排水, 2016, 32(17): 43-47.
- Li Xiaomin, Wang Jun, Chen Chao, *et al.* Chemical stability of desalinated seawater after entering into cement mortar lined pipes [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 43-47 (in Chinese).
- [9] 廖伟伶. 给水管材对水质的影响及防腐措施[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2012, 29(11): 93-98.
- Liao Weiling. The effect of water-supply pipeline materials on water quality and their corrosion-prevention measures [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2012, 29(11): 93-98 (in Chinese).
- [10] 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 Dan, Yuan Yixing, Ma Wencheng, *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 (in Chinese).
- [11] 刘恋. 再生水中球墨铸铁和PE管材生物膜及腐蚀特性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- Liu Lian. Researches on the Interaction between Biofilm

- and Corrosion Characteristics of Ductile Iron/PE Pipes Based on Reclaimed Water [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016 (in Chinese).
- [12] 邱微,王立友,樊庆铎,等. 给水球墨铸铁管腐蚀特性及腐蚀对水质的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016,48(8):61-66.
Qiu Wei, Wang Liyou, Fan Qingxin, *et al.* Corrosion characteristics of unlined cast iron pipe used in water supply system and impact of corrosion on water quality [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016,48(8):61-66 (in Chinese).
- [13] Brocca D, Arvin E, Mosbaek H. Identification of organic compounds migrating from polyethylene pipelines into drinking water[J]. Water Res, 2002,36(15):3675-3680.
- [14] Heim T H, Dietrich A M. Sensory aspects and water quality impacts of chlorinated and chloraminated drinking water in contact with HDPE and cPVC pipe [J]. Water Res, 2007,41(4):757-764.
- [15] Skjevrak I, Due A, Gjerstad K O, *et al.* Volatile organic components migrating from plastic pipes (HDPE, PEX and PVC) into drinking water[J]. Water Res, 2003,37(8):1912-1920.
- [16] Astoreca R, Doxaran D, Ruddick K, *et al.* Influence of suspended particle concentration, composition and size on the variability of inherent optical properties of the Southern North Sea [J]. Continental Shelf Research, 2012,35:117-128.
- [17] van Duin E H S, Blom G, Johannes Los F, *et al.* Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth[J]. Hydrobiologia, 2001,444(1/3):25-42.
- [18] Almroth R E, Eilola K, Hordoir R, *et al.* Transport of fresh and resuspended particulate organic material in the Baltic Sea—A model study [J]. Journal of Marine Systems, 2011,87(1):1-12.
- [19] Babin M, Stramski D, Ferrari G M, *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe [J]. Journal of Geophysical Research, 2003. DOI:10.1029/2001JC000882.
- [20] 贡丹燕. 城市景观水体表面污染物的悬浮颗粒物粒度分布特征研究[D]. 苏州:苏州科技学院, 2015.
Gong Danyan. Study on Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter on Apparent Pollution of Urban Water [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).
- [21] 董琪,赵鹏,张宏伟,等. 带水泥砂浆内衬铸铁管输配海水淡化水水质稳定性控制研究[J]. 海洋技术, 2013,32(1):69-72,86.
Dong Qi, Zhao Peng, Zhang Hongwei, *et al.* Water quality stability of desalinated water in cement mortar lined cast iron water supply systems [J]. Ocean Technology, 2013,32(1):69-72,86 (in Chinese).
- [22] 邹小勇,赵如松,慕朝,等. 含沥青质模拟油/水乳液液稳定性与界面性质关系 I. 界面张力和 Zeta 电位的影响[J]. 精细化工, 2013,30(2):193-197.
Zou Xiaoyong, Zhao Rusong, Mu Zhao, *et al.* Relationship between the stability of asphaltene model oil-in-water emulsion and interfacial properties I. Study of the effect of interfacial tension and Zeta potential [J]. Fine Chemicals, 2013,30(2):193-197 (in Chinese).
- [23] Liu J, Chen H, Huang Q, *et al.* Characteristics of pipe-scale in the pipes of an urban drinking water distribution system in eastern China [J]. Water Sci Technol: Water Supply, 2016,16(3):715-726.
- [24] Tong H Y, Zhao P, Huang C K, *et al.* Development of iron release, turbidity, and dissolved silica integrated models for desalinated water in drinking water distribution systems [J]. Desalination and Water Treatment, 2016,57(1):398-407.



作者简介:刘东坡(1992-),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为饮用水安全输配技术。

E-mail: liudongpo@e.gzhu.edu.cn

收稿日期:2019-02-13