

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 13. 006

供水管网系统中致黄物质分析及控制方法探究

章文文, 何苗, 许长丽, 汤峰

(合肥供水集团有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要: 为研究供水管网水压发生变化时如何有效控制水质突变的发生,以不同管龄及水压分布进行了水质在线监测,以水质突变频次为评价指标,发现管龄及水龄较长的管道易发生水质突变。对不同管龄的灰口铸铁管及球墨铸铁管的管道锈蚀物成分及形成机理进行了探究,分析结果表明,灰口铸铁管在使用15年后锈蚀情况较为严重,管道内壁锈蚀物中铁的含量达到了61.57%,在水压波动或水流逆向时极易发生铁锈蚀物的释放而引起水质突变。利用水力模型概算,计算了HWT区域节点流量、水量数据,在管道水流发生变化时能够预叛各节点水头损失,评估了管道迁改前后供水调度受影响区域,提出了一种面向管道施工导致的水压波动及水流逆向等情况下有效控制水质突变的方法,并准确揭示了区域供水管网系统控制水质稳定的机制,从而为保障供水管网整体安全运行奠定了基础。

关键词: 供水管网系统; 致黄物质; 管道锈蚀; 水力模型; 应急调度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0036-06

Analysis of Yellowing Substances and Their Control in Water Supply Network System

ZHANG Wen-wen, HE Miao, XU Chang-li, TANG Feng

(Hefei Water Supply Group Co. Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: To determine how to effectively control the fluctuation of water quality when the pressure of water supply network changes, the water quality was monitored online in pipelines with different ages and pressure distribution, and water quality fluctuation was found to be easy to occur in pipelines with old water age and pipe age by taking the frequency of water quality fluctuation as the evaluation index. The composition and mechanism of corrosion in gray iron and ductile iron pipes with different ages were investigated. After 15 years of operation, the corrosion of gray iron pipe was more serious. The proportion of iron in the corrosion of the pipe inner wall reached 61.57%. When water pressure fluctuated or the flow was reversed, the release of iron rust was easy to cause the fluctuation of water quality. Based on the hydraulic model estimate, the head loss of each node in HWT area was calculated when the node flow of the pipeline changed, and the affected areas of water supply dispatching before and after the pipeline transformation were evaluated. This paper proposed an effective method to control the fluctuation of water quality in case of water pressure fluctuation and water flow reverse caused by pipeline construction, and accurately revealed the mechanism of controlling water quality stability in regional water supply network system, which laid a foundation for safe operation of the whole water supply network.

Key words: water supply network system; yellowing substances; pipeline corrosion; hydraulic model; emergency dispatch

近年来,随着社会的快速发展及城市化进程不断推进,城市供水系统保障及饮用水安全等问题备受人们关注。饮用水处理技术日新月异,很多供水企业都已相继采用预氧化^[1-3]、臭氧活性炭^[4-5]和膜法^[6-7]等深度处理工艺来提高出厂水水质。但先进的饮用水制水工艺无法改变供水输配系统受影响产生的水质突变问题,如浊度、色度的升高,在管道颗粒物聚集较多时甚至会出现“黄水”现象。

目前,城市供水管网大多使用铸铁管(球墨铸铁管、灰口铸铁管、高硅铸铁管)和钢塑管(内壁涂有高附着力防腐聚乙烯或环氧树脂涂料)等具有一定耐压、防腐性能的管材,其中球墨铸铁管(内衬水泥砂浆)因具有抗拉伸性能好、刚度强、耐腐蚀等特点成为应用最为广泛的供水管材。然而由于之前供水管网建设受年代及技术方法的限制,20世纪至今我国很多城市供水管网所采用的管道材料品种及质量参差不齐,这些管材已经远超使用寿命。

由于这些管材大都铺设在城市中心或城市主要道路下面,更换极为不便,导致在长期使用过程中管道内壁涂层剥离后,内壁铁质与水直接接触而发生铁释放,形成锈蚀物^[8-9];且锈蚀物在管道内壁积聚会逐渐形成锈蚀瘤,很容易使管道发生堵塞及渗漏^[10]。在水压波动较大、水流逆向或管道内水体化学平衡被打破的情况下,极易发生较大面积“黄水”事件,甚至会导致管道漏水或爆裂等事故^[11-12]。笔者针对HS地区供水管网腐蚀状况、管道致黄物质成分及形成机制进行了分析,探究在管网水压发生较大变化、水流逆向的情况下如何有效控制水质突变的发生。

1 区域供水管网运行系统

1.1 区域供水结构及供水管道现状

截至2021年,HS区域共有8个制水厂、9个区域供水分公司,供水区域面积达到740 km²,供水管网总管程约为7.4×10³ km(其中球墨铸铁管的占比达到85%,管龄超20年的占比为4.6%)。管网运行体量庞大,且布局十分复杂。在现有9个一级分区的基础上,如何有效控制管网水质和水压成为供水保障的关键。

1.2 供水监测点的布置

为满足区域供水的安全性及城市发展的需求,HS区域采用多水源供水保障。HS区域供水结构见图1。由于多水源长距离调水及季节性水源水质变化会引起管网水质波动,为有效掌握区域的供水水质和水压,确保城市供水得到有效保障和优化调度,针对原水厂和制水厂、人口稠密区、管网末梢、二次供水泵房等设置了供水监测点。监测点的水质和压力数据能够在线远传至调度中心。同时,为应对管网水质的变化,设置了130多个水质监测点来综合分析供水管网的水质情况。



图1 HS区域供水结构

Fig.1 Water supply structure of HS area

1.3 区域供水水质突变的影响因素

影响供水水质的因素有很多,其中供水管道的材质、管龄及管道内的自来水水龄是重要因素。通过研究区域多年水质监测点的综合数据发现,管道材质及管龄是影响该区域管网水质,例如浊度、pH、色度、铁、COD_{Mn}等常规指标的重要因素。

针对HS区域偶发性水质突变现象,按照供水特点划分了4个不同类型供水监测点进行连续一年的在线水质监测分析,包括管龄在10年以上的老城区(a)、管龄在10年内的中心城区(b)、管龄在5年内的低压区(c,水龄较长)、管龄在10年以上的低压区(d,水龄较长),不同类型管道偶发水质突变次数统计及水质突变浊度指标监测结果如图2所示。可

知,在区域供水水压波动、水流逆向或管道内水体化学平衡被打破时都会引起管网水质波动,而且管龄较长及水龄较长的管道易发生水质突变。

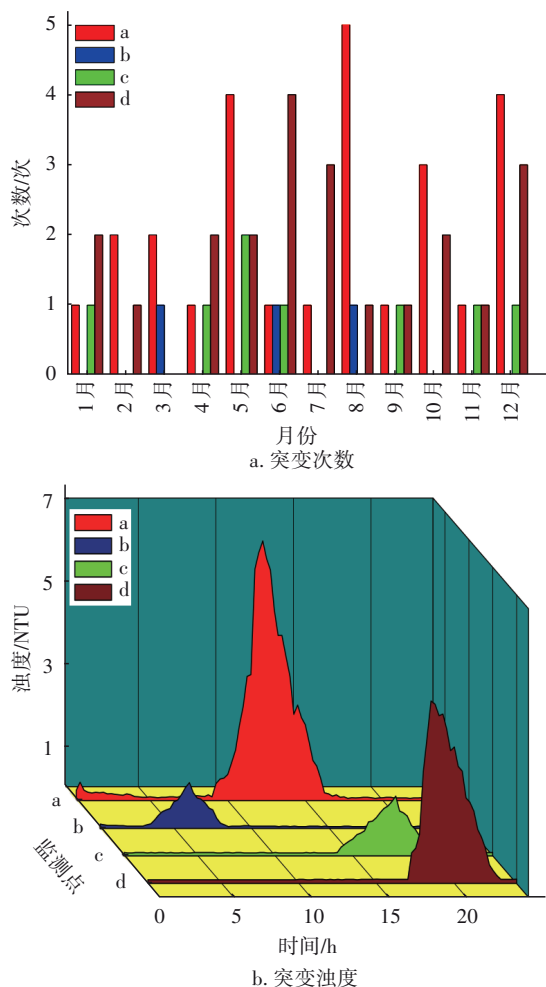


图2 HS区域不同类型管道偶发水质突变次数及浊度情况
Fig.2 Occasional water quality fluctuation frequency and turbidity of different types of pipelines in HS area

1.4 管道锈蚀物成分分析

结合区域管网漏损排查与水质监测发现,供水管网“黄水”事件的发生多是由于管道腐蚀及管垢对供水管网系统污染导致。通过追踪解决水质突变调查以后发现,水质突变点的管道大多为灰口铸铁管或球墨铸铁管。为进一步了解不同材质及管龄的管道腐蚀情况,在HS区域结合供水管道建设施工进行布点,对符合条件的灰口铸铁管和球墨铸铁管按照管龄进行分类,通过截取不同材质及管龄的供水管道进行内壁管垢成分分析,结果如图3所示。对不同管材锈蚀物及附着物样品进行烘干,恒质量以后称取适量固体样品进行微波消解、稀释,

再采用等离子体发射光谱仪进行测定,分析试样中的金属元素含量。

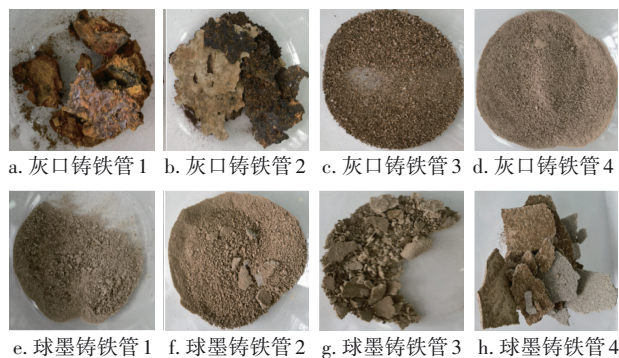


图3 不同管材截取的锈蚀物及附着物样品

Fig.3 Corrosion and attachment samples taken from different pipes

表1为不同管龄管材内壁锈蚀物金属成分及含量。可以看出,灰口铸铁管在使用15年后其锈蚀情况较为严重,管道内壁锈蚀物中铁含量达到了61.57%,在水压波动或水流逆向时极易造成水质突变,出现“黄水”现象(水质监测数据也验证了该现象)。而球墨铸铁管内壁沉积物大多是由物理沉积及电化学腐蚀共同作用导致的,在水压波动或水流逆向时不易脱落,从而引起水质变化。观察不同使用年限球墨铸铁管发现,管道内壁虽然不会出现大面积锈蚀,但内壁附着的沉积物会随着使用年限的增加出现板结脱落现象,进而也会出现管道内壁锈蚀,从而影响水质。分析监测点综合水质数据发现,水压波动较大时,灰口铸铁管段的水质突变明显大于球墨铸铁管段,而且在发生水质突变时水中铁的含量也与管材、管龄有着密切关系。

表1 不同管龄管材内壁锈蚀物金属成分及含量

Tab.1 Metal composition and content of inner wall corrosion at different pipe ages

项 目	管龄/ a	Fe 含 量/%	Al 含 量/%	Mn 含 量/%	Cu 含 量/%	Zn 含 量/%	Ba 含 量/%
灰口铸铁管1	>15	61.57	1.23	0.45	0.30	0.05	0.14
灰口铸铁管2	15	52.74	1.85	0.32	0.44	0.11	0.20
灰口铸铁管3	10	34.72	3.24	1.23	0.35	0.10	0.28
灰口铸铁管4	5	8.94	5.32	0.98	0.26	0.19	0.42
球墨铸铁管1	5	1.03	2.56	0.52	0.37	0.47	0.26
球墨铸铁管2	10	5.37	4.39	0.58	0.44	1.19	1.30
球墨铸铁管3	15	8.07	8.13	9.76	0.33	1.85	1.66
球墨铸铁管4	>15	31.90	10.23	15.88	0.24	5.32	3.48

1.5 管道腐蚀机理探究

在供水管网系统中,水质(Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、pH、溶解氧、碱度等指标)变化会影响灰口铸铁管、球墨铸铁管等管道管垢的形成^[13-16],管道锈蚀垢也会随着表面接触不断向管道中心累积,进而随着水压或水流的变化发生脱落来影响管道水质。供水管道影响铁释放形成锈蚀垢的因素有很多,其中管道材质、管龄、水龄及水质条件都会对铁释放造成一定影响,通常管道腐蚀是由这些因素共同作用导致的。

Aulia等^[17]、Fatt等^[18]对管道内壁铁锈蚀物的形成过程进行了分析,发现平滑致密的管道内壁吸附在外层,主要发生了析氢腐蚀,形成的管垢中含有 $\alpha\text{-FeOOH}$ 和 $\gamma\text{-FeOOH}$ 等 Fe(III) 化合物。当管网中氧含量较低时, FeOOH 会代替氧作为电子受体继续与铁发生反应,造成铁释放,进一步腐蚀管道。而紧实多孔的包裹内衬则更易发生吸氧腐蚀,加剧亚铁离子的氧化,在管道表面形成较为稳定的氧化膜[多为含有 Fe_3O_4 等 Fe(II) 与 Fe(III) 共存的化合物],以减缓铁释放,均匀腐蚀会形成均匀的铁垢,局部腐蚀会形成包裹聚集的腐蚀瘤。

而管道锈蚀物的产生多为管道内壁金属构筑物与水接触界面发生了电化学反应,金属参与反应生成氧化态的难溶盐沉积在管道内壁形成管垢,然而水压或水流变化会使沉积的管垢发生脱落,进而引起铁释放并溶解进入管网水中,易导致“黄水”事件的发生。而锈蚀物会反向影响水质,进而加剧管道腐蚀,逐渐形成腐蚀瘤。图4为管道中铁释放及锈蚀垢形成的机理。

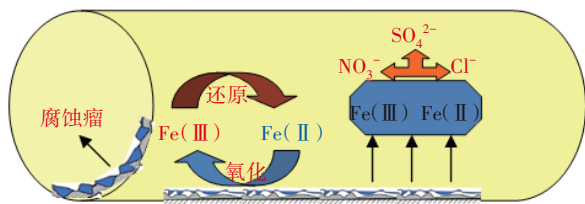


图4 管道中铁释放及内壁锈蚀垢形成的机理

Fig.4 Mechanism of iron release and inner wall rust scale formation of pipe

2 试点运行与控制分析

2.1 水力模型与管网迁改试点

为研究如何预判在水压波动的情况下有效控制管网水质的波动,结合供水管道迁改施工开展了

输配水管网启闭、运行以及风险评估。本次迁改施工为DN1 600的主供水管道TQ段(持续时间为12 h),主供城市西南区域(HWT区域)用水,HWT区域日供水量在 $19 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,约占该区域Q水厂供水量的2/5。

通过对HWT区域进行管网拓扑结构分析,并收集管网静态信息和动态信息,建立并开发了区域水力模型,借助水力模型计算了该区域节点流量、水量数据,在管道水流发生变化时能够初步预判各节点水头损失,评估了管道迁改前后供水调度受影响区域,如图5所示(黄线内)。由于此次迁改施工在供水主干管上,该主干管在关阀停水迁改过程中会导致HWT区域供水管网流量、流速、流向的变化,极易出现大面积水质突变、黄水等事件,如果不对全市供水管网进行有效调度,将会严重影响城市西南部片区居民及工业生产用水。

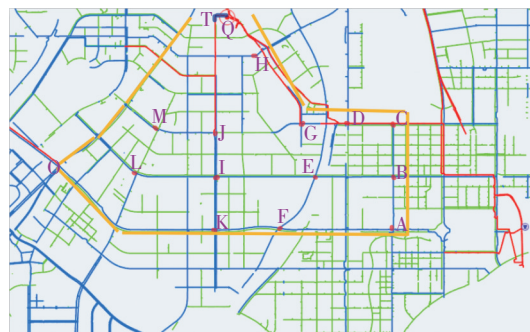


图5 HWT区域管道迁改前后供水调度受影响区域

Fig.5 Affected area of water supply dispatching before and after pipeline transformation in HWT area

2.2 区域输配水应急调度

供水管道迁改施工前,通过HWT区域水力模型概算发现,此次TQ段迁改工程会导致KT段水流逆向、MG段与LE段水压波动较大(水流方向发生改变或流速变化超过0.3 m/s)。为减少供水管道迁改期间对居民用水的影响,合理协调施工单位、各水厂及HWT区域供水分公司制订了详细的应急调度方案,主要包括三个方面:①提前冲洗ML、BL、MG段管网,逐步打开主控阀门K,防止供水管道迁改期间水流逆向;②在关闭JM段DN1 200阀门、DN1 000阀门、DN300阀门的同时,关闭OT段北侧DN800阀门,逐步打开OK段沿线主控阀门,实现联网通水(调度其他水厂供水量进行补充转输能力以控制水压波动),尽可能减少对HWT区域供水压力及水质

的影响;③制订施工前后区域联动方案,提前缩小此次迁改所涉及的Q水厂供水范围,并对施工期间涉及的供水支管进行有效排水、排气,科学布局施工前后水质监测点及排放口(A~M)。

2.3 区域输配水管网水质控制分析

主供水管道TQ段迁改施工会引起一定范围的水流逆向及水压波动,可能会使管道内壁的沉积物管垢发生脱落,从而进入管网带来颗粒物,甚至黄水。供水管道TQ段迁改施工期间,利用OK、AF段进行供水补给,根据压力监测点数据发现,除KJ、GF段水压波动较大外,其他监测点水压无明显变化。及时加大KJ、GF路段的消防栓排水,水质监测点连续24 h的监测数据表明,除G、E监测点水质有波动外,其他监测点水质均相对平稳,各监测点浊度的变化如图6所示。因应急调度和区域联动科学到位,HWT区域正常供水,部分低压供水(高峰时期下降3~7 m),没有完全停水区域。区域联动管道累计传输水量为17 878 m³,当日HWT区域供水量减少8×10⁴ m³(不到正常用水量的1/3);无用水水质相关投诉,实际受到影响的范围也控制在原有预计中。结果显示,A~M临时排放点的建立及排水主要在迁改施工初期发挥作用,而水质监测点的提前预警监测有助于及时排放高浊度黄水,可积极应对迁改作业期间可能出现的“黄水”等水质事件,有效解决了HWT区域水质突变风险。

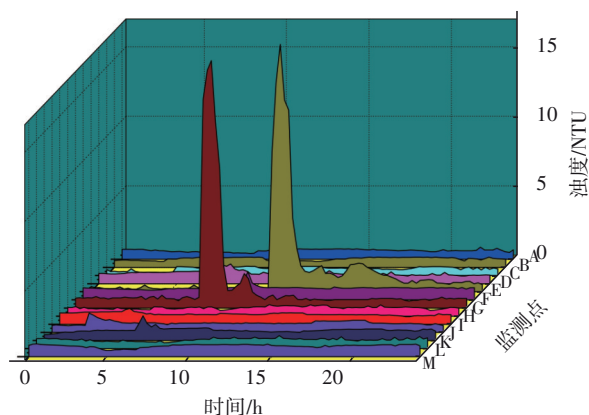


图6 HWT区域管道迁改前后各监测点浊度的变化

Fig.6 Changes of turbidity at monitoring points before and after pipeline transformation in HWT area

3 结论

① 监测了4种不同类型管道发生水质突变的风险,发现管龄较长的低压区容易受水压和水流波

动造成水质突变。分析不同材质及管龄的管道内壁锈蚀物成分发现,管龄超过15年的灰口铸铁管内壁锈蚀情况最为严重,管道内壁锈蚀物中铁的含量达到了61.57%,对供水管道影响铁释放形成锈蚀垢的因素及机理进行了探讨。

② 结合区域供水管道迁改施工试点,通过对HWT区域水力模型进行概算,在可能存在的水质突变风险点设置了监测点及排水口,在迁改施工期间实时监测水质的变化情况,及时排放高浊度黄水。同时,提出了一种面向管道施工导致的水压波动及水流逆向等情况下有效控制水质突变的方法。通过监测点数据发现,非主线输配水作业管道在受到水压波动时有引发水质突变风险,并准确揭示了区域供水管网系统控制水质稳定的机制,从而为保障供水管网整体安全运行奠定了基础。

③ 在后期供水管道建设中,将建立全区域水力模型,进一步优化HS区域管道施工监测实施布局,达到提前排放管龄较长及水龄较长管道的存水,降低水质波动的风险。最终在供水管网运行系统中有效控制水质的稳定,并对区域供水管网漏损进行有效控制。

参考文献:

- [1] 周立娇,张怡然,魏振彦,等. 预氧化消毒方式对三卤甲烷控制的生产性试验[J]. 中国给水排水, 2021, 37(13):65-69,76.
ZHOU Lijiao, ZHANG Yiran, WEI Zhenyan, et al. Productive test of trihalomethanes control by different preoxidation disinfection processes [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(13):65-69,76(in Chinese).
- [2] 李思敏,赵静霄,唐珍芳,等. 高锰酸盐复合药剂预氧化对微污染源水的净化效果[J]. 中国给水排水, 2012, 28(5):50-52.
LI Simin, ZHAO Jingxiao, TANG Zhenfang, et al. Purification efficiency of micro-polluted source water by potassium permanganate composite pre-oxidation [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(5):50-52 (in Chinese).
- [3] XIA S J, ZHANG X R, ZHAO Y C, et al. Effect of pre-oxidation on coagulation/ceramic membrane treatment of Yangtze River water [J]. Membranes, 2021, 11(5):369.
- [4] 陆少鸣,施燕,尹宇鹏,等. 两种工艺处理微污染水的

- 比较研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 102-104.
- LU Shaoming, SHI Yan, YIN Yupeng, *et al.* Comparison between two processes for micropolluted source water treatment[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(13): 102-104 (in Chinese).
- [5] CHUANG Y H, SZCZUKA A, SHABANI F, *et al.* Pilot-scale comparison of microfiltration/reverse osmosis and ozone/biological activated carbon with UV/hydrogen peroxide or UV/free chlorine AOP treatment for controlling disinfection byproducts during wastewater reuse[J]. Water Research, 2019, 152:215-225.
- [6] AL-GHAFRI B, LAU W J, AL-ABRI M, *et al.* Titanium dioxide-modified polyetherimide nanofiber membrane for water treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2019, 32: 100970.
- [7] ROGIO R A, MIYAZAKI L F, OLIVEIRA M A D, *et al.* Pre-coagulation assisted ultrafiltration membrane process for anaerobic effluent [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(5): 104066.
- [8] WANG H B, HU C, HAN L C, *et al.* Effects of microbial cycling of Fe(II)/Fe(III) and Fe/N on cast iron corrosion in simulated drinking water distribution systems[J]. Corrosion Science, 2015, 100: 599-606.
- [9] 郭浩, 田一梅, 张海亚, 等. 铁质金属供水管道的内腐蚀研究进展[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 70-75.
- GUO Hao, TIAN Yimei, ZHANG Haiya, *et al.* Research progress on internal corrosion of iron-metal pipes of water distribution systems[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 70-75 (in Chinese).
- [10] 陈求稳, 曲久辉, 刘锐平, 等. 北京市供水管网的老化漏失规律模型研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(11): 52-56.
- CHEN Qiuwen, QU Jiuhui, LIU Ruiping, *et al.* Rule-based model for aging-induced leakage from water supply pipe network in Beijing City[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(11): 52-56 (in Chinese).
- [11] SEICA M V, PACKER J A. Mechanical properties and strength of aged cast iron water pipes [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(1): 69-77.
- [12] BESSON-TABOADA S E. Applying cast iron pipes aging prediction methodology to the Mendoza, Argentina drinking water network [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2001(4): 201-207.
- [13] SUN H F, SHI B Y, YANG F, *et al.* Effects of sulfate on heavy metal release from iron corrosion scales in drinking water distribution system[J]. Water Research, 2017, 114: 69-77.
- [14] ZHANG S N, TIAN Y M, GUO Y J, *et al.* Manganese release from corrosion products of cast iron pipes in drinking water distribution systems: effect of water temperature, pH, alkalinity, SO_4^{2-} concentration and disinfectants[J]. Chemosphere, 2021, 262: 127904.
- [15] LASKOWSKI T, SROKA M, OLEJNIK A, *et al.* Cast iron filings-based model for observation of nitrate reduction in corroded system [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 57(41): 19418-19430.
- [16] TAN H Q, HE W J, HAN H D, *et al.* Speciation of iron and development of iron corrosion scales in drinking water distribution systems [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 56(3): 646-654.
- [17] AULIA R, TAN H, SRIRAMULA S. Prediction of corroded pipeline performance based on dynamic reliability models [J]. Procedia CIRP, 2019, 80: 518-523.
- [18] FATT M S H, XUE J H. Propagating buckles in corroded pipelines [J]. Marine Structures, 2001, 14(6): 571-592.

作者简介: 章文文(1990-), 男, 安徽芜湖人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为给水处理与饮用水水质安全保障技术。

E-mail: zhangwenwen405@163.com

收稿日期: 2021-07-09

修回日期: 2021-09-08

(编辑: 任莹莹)