

胡玲. 供水管道内腐蚀鉴定技术与模拟方法研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(2): 17-26, 69.

HU L. Research progress of identification technology and simulation methods for internal corrosion of water supply pipelines[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2): 17-26, 69.

供水管道内腐蚀鉴定技术与模拟方法研究进展

胡 玲*

(上海城投水务<集团>有限公司供水分公司, 上海 200002)

摘 要 内腐蚀是引起供水管道漏损、缩径以及水质恶化的重要原因之一。针对上述问题,文中从物理、化学和生物 3 个角度出发,梳理了供水管道内腐蚀的成因和过程。同时,将内腐蚀鉴定归纳总结为:依据内腐蚀现状形态的直接鉴定法,以及依据内腐蚀导致的运行影响的间接鉴定法。此外,对管道内腐蚀研究中包括实物模拟、机理等效模拟和计算模拟等研究方法进行汇总,最终提出了未来在内腐蚀鉴定和模拟方法的技术展望。

关键词 供水管道 管道内腐蚀 腐蚀成因 鉴定 模拟方法

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)02-0017-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.02.003

Research Rrogress of Identification Technology and Simulation Methods for Internal Corrosion of Water Supply Pipelines

HU Ling*

(Shanghai Chengtou Water <Group> Co., Ltd., Water Supply Branch Company, Shanghai 200002, China)

Abstract Internal corrosion is one of the important reasons for water supply pipeline leakage, shrinkage, and deterioration of water quality. In response to the above issues, the causes and processes of internal corrosion in water supply pipelines from the perspectives of physics, chemistry, and biology were analyzed in this paper. At the same time, the identification of internal corrosion was summarized as a direct identification method based on the current state of internal corrosion, as well as an indirect identification method based on the operational impact caused by internal corrosion. And the research methods of pipeline internal corrosion were summarized, including physical simulation, mechanism equivalent simulation, and computational simulation. Finally, the technical outlook for future internal corrosion identification and simulation methods was proposed.

Keywords water supply pipelines internal pipeline corrosion corrosion cause identification simulation method

供水系统是城市的生命线^[1],其健康运行才能满足我国城市高质量发展和人民美好生活的需求^[2]。截至 2021 年,据国家统计局报道,我国的年供水总量已达 673.34 亿 m³,供水管道长度达 1 059 901.18 km,供水管道如何高效地维护已成为供水行业关注的焦点。管道运行中出现的内腐蚀现象极易造成漏损和爆裂问题,管道内腐蚀不仅影响

管道的水流输送,还会导致水质劣化^[3]。目前,本领域的相关文献尚无对管道内腐蚀鉴定手段及模拟方法的系统归纳,因此,本文对供水管道的内腐蚀机理和相应的内腐蚀鉴定手段进行综述阐述,并归纳总结了现行研究中所采用的模拟方法,以便于行业相关技术工作者更加全面地了解供水管道内腐蚀。

1 供水管道内腐蚀成因与过程

供水管道在其特定工作环境中由于内外因素(主要是管材自身和城市饮用水物理和生化特点),会累积物理损伤、化学内腐蚀和生物内腐蚀^[4],并进一步导致所输送水流的水质指标劣化。我国现有金属供水管材主要包括灰口铸铁管、球墨铸铁管、钢管、不锈钢管等,非金属管材主要是硬质聚氯乙烯

[收稿日期] 2023-09-17

[基金项目] 基于内壁腐蚀与水质稳定性的供水管道性能评估研究(KY.Gs.23.001)

[通信作者] 胡玲(1982—),女,硕士,高级工程师,主要从事供水管网运行管理、营销管理、漏损控制、数字化建设等工作,E-mail:huling021@163.com。

(UPVC)、聚乙烯(PE)管等。金属管道大多采用硅酸盐水泥砂浆作为内衬,当内衬失效后,基管也将进

一步发生内腐蚀,我国供水管道中常见的管材与内腐蚀特点总结如表 1 所示^[3-8]。

表 1 我国供水管道常见管材与内腐蚀特点

Tab. 1 Common Pipes and Internal Corrosion Characteristics of Water Supply Pipelines at Home

基管性质	基管类型	内衬类型	特点
金属管道	灰口铸铁管(已经逐渐淘汰)	早期无内衬,后期以硅酸盐水泥砂浆内衬为主	(1)硅酸盐水泥内衬耐内腐蚀 (2)灰口铸铁易内腐蚀
金属管道	球墨铸铁管	硅酸盐水泥砂浆内衬为主	(1)硅酸盐水泥内衬耐内腐蚀 (2)无内衬时内腐蚀加速
金属管道	钢管	硅酸盐水泥砂浆内衬为主	(1)硅酸盐水泥内衬耐内腐蚀 (2)无内衬时内腐蚀加速
金属管道	不锈钢管	无内衬,其本身也可作为普通碳钢管的内衬	(1)抗内腐蚀能力较强 (2)会出现微生物点蚀 (3)会出现缝隙内腐蚀
非金属管道	PE	无内衬	(1)耐内腐蚀 (2)遵循高分子材料老化特点
非金属管道	UPVC(已经逐渐淘汰)	无内衬	(1)耐内腐蚀 (2)遵循高分子材料老化特点

1.1 物理损伤

由于管道自身机械性能和力学性能(例如抗剪性能、抗压性能、抗弯性能、抗冲击性能、强度和硬度等)以及被输送流体的水力状态(例如流速、流态等)的特点,供水管道中会出现物理损伤^[9-10],管道的物理损伤与老化内腐蚀之间联系密切^[11]。施加在管道上的各类荷载可能导致机械性损伤,包括管道内部所承受的水压力、水重力,以及外部的覆土荷载、交通荷载、地震荷载和冷冻荷载等^[10,12-13],损伤严重时甚至导致爆管和泄漏问题^[14]。最为显著的是在管道输送水时,水的流动引起的剪切力将剥蚀金属管道内表面^[15],而水流的冲刷不仅会造成机械性损伤,还将强化溶解氧和无机阴离子向管壁的传质过程^[16-17],从而加剧化学内腐蚀和生物内腐蚀。

1.2 化学内腐蚀

硅酸盐水泥砂浆内衬可以延缓铁基材料基管的内腐蚀^[18-19],但在使用一定时限后也面临内衬内腐蚀失效的问题^[7,20-21]。水泥砂浆内衬的主要合成来源是水泥、沙子和水^[19],水泥的主要成分是硅酸钙,包括 75% 以上的硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、硅酸二钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)和 25% 左右的铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)、铁铝酸四钙($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)等^[6,20,22]。硅酸盐水泥砂浆的内腐蚀主要是钙溶解和其他形式的脱钙^[23],硅酸盐水泥砂浆表面 10~100 nm 空隙中的钙易溶出,其孔隙率会不断增加至失效^[23-24],在这

一过程中,溶解钙的碳酸盐和水解盐以及氯离子(Cl^-)、硫酸根离子(SO_4^{2-})等均会对水泥砂浆内衬内腐蚀起到促进作用^[25-27]。

对于铁基材料的基管,在内衬内腐蚀失效后,有内衬的管道以及无内衬的管道都将面临金属内腐蚀问题,金属管道内腐蚀产物主要体现为形状不规则的管瘤。在金属管道的电化学内腐蚀中,部分金属点位作为阳极发生氧化反应失去电子,变为金属阳离子从而溶解到电解质溶液中,氢离子(偏酸性介质中)或溶解氧(中性或偏碱性介质中)得电子被还原^[9,28]。在实际管道中,阳极区的分布将决定表面内腐蚀的形貌特点。各类无机阴离子,例如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和碳酸根离子(CO_3^{2-})都能通过增强离子和电子迁移或破坏钝化层从而对内腐蚀产物的生成有贡献,并且能够影响内腐蚀产物的组成和形态^[29-30]。在铁内腐蚀产物中常见的化合物形态包括针铁矿($\alpha\text{-FeOOH}$)、磷铁矿($\gamma\text{-FeOOH}$)、磁铁矿(Fe_3O_4)、菱铁矿(FeCO_3)、氢氧化亚铁 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ 、氢氧化铁 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ 、铁水合物($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)、绿锈[例如 $\text{Fe}_4^{\text{II}}\text{Fe}_2^{\text{III}}(\text{OH})_{12}\text{CO}_3$]和碳酸钙(CaCO_3)^[31-32]。

UPVC 管的内腐蚀遵循高分子材料的老化内腐蚀规律,主要表现为在输送含氯水时管道内表面残留的低分子量有机物释放^[5,33],以及表面分子被氯氧化^[34],UPVC 的有机物释放量和释放速率比未增塑 UPVC 管和无规共聚聚丙烯(PPR)管都要高^[35]。

在较高温度环境下 UPVC 管老化还将加速^[36], 较低温度下 UPVC 管也易发生较大伸缩形变并导致漏损^[37]。

1.3 生物内腐蚀

供水管道的生物内腐蚀是管道内表面细菌、真菌、病毒、藻类和原生动物等微生物的生长^[38-39], 以及其代谢产物, 例如胞外聚合物 (EPS) 中羧基 ($-\text{COOH}$)、磷酸基 [$-\text{PO}(\text{OH})_2$] 和 SO_4^{2-} 等基团, 对管道完整结构与良好性能的破坏^[40-41], 并形成相应的生物膜的过程。金属管道表面发生化学内腐蚀后, 管壁粗糙度、含水率和黏滞性增加, 微生物更易于吸附和生长形成生物膜^[42-44]。UPVC 在微生物附着问题上表现优于钢管和球墨铸铁管^[33, 42-43], 球墨铸铁管最易于微生物附着^[45], 这是由于内腐蚀产物中的铁、铜和锌也是微生物生长所需金属元素^[46]。近年来, 造成管道内腐蚀的微生物被研究者广泛报道, 如铁氧化细菌 (iron-oxidizing bacteria, IOB)、硫氧化细菌 (sulfur oxidizing bacteria, SOB)、硫酸盐还原细菌 (sulfate reducing bacteria, SRB)、产氨细菌 (ammonia producing bacteria, APB) 和硝化细菌 (nitrifying bacteria, NB) 等。微生物在代谢活动中通过改变管壁电极电势, 或在管壁形成浓差电池, 从而参与金属管壁电化学过程, 使金属给出电子后发生腐蚀, 造成 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 的生成, 并诱导形成 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 Fe_3O_4 、 FeCO_3 等不同晶型^[46-49]。

2 供水管道内腐蚀鉴定手段

供水管道产生的内腐蚀导致其结构受损, 影响管道的正常使用寿命, 因此, 需要进行内腐蚀鉴定,

从而制定相应的冲洗、修复或更换等处理工作。本文将内腐蚀鉴定方法分为直接和间接两种, 直接鉴定是依据内腐蚀的现状形态进行, 间接鉴定则是依据内腐蚀导致的运行影响来进行。

2.1 直接鉴定法

直接鉴定法关注管道内腐蚀后的相应形貌改变, 以此鉴定内腐蚀的发生与否和程度大小, 包括内腐蚀部位的宏观形态与微观检测, 需使用专门仪器设备进行检测。直接鉴定法的应用场景主要是诊断管道内腐蚀程度, 在漏损控制与管道更换过程中提供管内信息, 从而采取相应技术手段。

2.1.1 内腐蚀部位宏观形态外观

供水管道内腐蚀部位的宏观外观会发生显著变化, 化学内腐蚀引起的凸起管瘤和表面附着的管垢 (包括管道内腐蚀产物、微生物生物膜和水流沉积物复合物) 与正常内壁的形态外观都具有差异, 内腐蚀后的管道在宏观形态外观上易于辨认。凸起的管瘤内、外部特征不同, 外部一般平滑而致密, 内部则呈现疏松多孔结构^[32, 50]。严重内腐蚀的管道甚至由于结构不完整发生漏损, 根据这些宏观外观形态鉴定内腐蚀可以通过光学检测技术、电磁波检测技术、声学探听技术和超声波检测技术进行鉴定。视觉检测技术中闭路电视 (closed-circuit television, CCTV) 是常见的技术方法, 可沿管道捕获图像和视频^[51-52], 电磁检测技术中探地雷达 (ground penetrating radar, GPR) 较为常用^[53], 声学探听技术和超声波检测技术近年来也较多地被应用^[54], 依据宏观形态外观的鉴定技术归纳如表 2 所示^[53, 55-56]。

表 2 管道内腐蚀鉴定技术
Tab. 2 Identification Technology of Internal Corrosion of Pipelines

类型	技术原理	应用举例	工作条件	鉴定依据
光学检测	可见光形态观测	CCTV	断水	内腐蚀部位形态外观
光学检测	激光轮廓扫描	激光扫描	断水	内腐蚀部位形态外观
电磁波检测	电磁波探测与测距	GPR	管道外	漏损发生
声学探听	声波探测与测距	声呐剖面系统	流水	内腐蚀部位形态外观
声学探听	声波探测与测距	冲击回声	管道外	漏损发生
光学检测结合声学探听	声波探测与测距	撒哈拉系统	流水	内腐蚀部位形态外观结合漏损发生
声学探听	声波探测与测距	智能球	流水	漏损发生
超声波检测	超声波探测与测距	相控阵技术	管道外	漏损发生

2.1.2 内腐蚀部位微观物理化学属性

基于供水管道金属内腐蚀产物微观的化学属性,可以对微观形貌和化学成分与晶体结构进行内腐蚀鉴定。常用的微观形貌分析技术有扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM),常用的化学成分与晶体结构分析技术有X射线能谱分析(X-ray energy dispersive spectrometer, EDS)、X射线荧光光谱(X-ray fluorescence spectroscopy, XRF)、X射线电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)、X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)等。SEM可以对管道表面微观形态进行观测^[31,50,57-59],EDS可以对内腐蚀管垢元素组成进行分析^[31,50,57,59],XRF可以对内腐蚀产物进行元素组成分析^[50,58-59],XPS可对内腐蚀表面的化合物元素组成、原子排列以及电子状态等进行分析^[50],XRD可对内腐蚀产物化合物晶体组成进行分析^[31,50,57-59]。

2.2 间接鉴定法

间接鉴定法关注内壁腐蚀后对水质和水力参数的影响,从水力水质的变化量来鉴定管道是否发生了内腐蚀以及内腐蚀程度的大小。由于供水管道的水力停留时间可达2~3 d甚至更长时间,对于被输送水流,管道不仅是输送通道,同时也是巨大的反应器^[8]。对于已经内腐蚀的管道,水力状态稳定的条件下,管壁内腐蚀部位与水流之间存在稳定的物质交换,特别是在水力状态发生急剧变化之后,例如水源切换、水力条件突变时,会出现更为显著的水质变化^[60]。

2.2.1 管道流体输送能力降低

当供水管道内腐蚀不断累积时,管道内壁内腐蚀部位的增厚往往增加水流通过的摩擦阻力,供水管道的水头损失增加,流体输送能力降低,可以从水厂泵的运行条件、用户能够使用的水头间接鉴定管道内腐蚀的发生与程度。陈跃等^[61]报道,随着管道使用年限增加,管道的糙度增加,海曾-威廉系数C值将下降30%以上,极大地增加了水头损失。

2.2.2 管道金属元素释放与水质化学指标改变

对于金属供水管道,管道内腐蚀引起的重金属元素释放现象十分显著,铁基材料基管的内腐蚀将引起铁溶出进入水中^[4,62],同时还存在锰、镍、铜、铅、铬等重金属进入的风险^[3,63]。非金属材料中,UPVC管道对水质化学指标的改变是释放有机物引起的总有机碳增加和消毒副产物增加^[35,46]。管道

内腐蚀后的氯衰减速率增加的问题同样值得关注,由于管道发生内腐蚀后,与氯反应的物质增加,内腐蚀产物和生物膜都将加剧氯衰减,管壁对氯的消耗比主体水流的消耗快1~2个数量级^[64-66]。

2.2.3 水质生物风险增加

管道内腐蚀后生物膜的生长和脱落将使水质生物风险增加,水中菌落数首先增加^[67]。一般情况下,生物膜中的微生物不具备致病性,但大量的生物膜给病原微生物和机会致病菌等有害生物提供了附着和生长的机会^[68]。其中有害生物的增加,以及病原微生物和机会致病菌在水中的扩散,使得能够引发肠道感染的肠道沙门氏菌和霍乱弧菌等粪源致病菌,以及引发肺部感染的铜绿假单胞菌和军团菌都有概率进入水中威胁用水安全^[46]。管道生物膜的存在也将增加微生物产生的氯耗,从而增加消毒副产物的生成危害^[68]。

2.2.4 饮用水感官指标变化

当管道内腐蚀后,饮用水中铁、锰等物质含量增加,浑浊度、色度升高,甚至将出现“黄水”“红水”现象^[9,61],相关研究^[69]发现浑浊度与总铁含量呈正相关。同时,由于内腐蚀产物的进入和化学指标的改变,尤其是总有机碳、挥发性有机物等指标的增加,使得饮用水的味感指标受影响^[70-71]。

3 供水管道内腐蚀模拟方法

为了探究和明晰供水管道内腐蚀的规律,需要借助相应的模拟方法对管道内腐蚀进行模拟,目前研究中常见的模拟方法包括实物模拟、机理等效模拟和计算模拟等模拟方法类别。常见的模拟方法的特点归纳如表3所示。

3.1 实物模拟

小比例管道模型多应用于中试系统,能够较好还原管网系统的真实运行情况,一般采用较小管径的管道组成模拟系统,并通过泵进行单向流或循环流供水,采取完整管道的内腐蚀样本。林明利等^[60]研究水源切换背景下的水质变化时,采用中试系统的受试管网进行模拟,并保证在水力条件与实际管网相接近的条件下运行,根据储备水量的多少控制单向流或循环流。周昭彦等^[72-73]在中试管道模型中接种了军团菌和阿米巴原虫生物膜探究消毒方法对其灭活的效果。Zhang等^[74]使用循环水管道生物反应器验证了生物膜的脱离

表 3 管道内腐蚀模拟方法归纳
Tab. 3 Summary of Pipeline Internal Corrosion Simulation Methods

模拟方法类别	使用场景	模拟方法实例	理论依据与模拟侧重点	优势	局限
实物模拟	中试	小比例管道系统	管道实际运行状态	较真实模拟管道运行	(1) 占据空间大 (2) 水量消耗大
机理等效模拟	实验室	管道生物反应器	水力状态等效(剪切力、停留时间等)	(1) 占地小、运行简便	不能完全模拟管道的水力状态、应力状态
		烧杯试验	化学反应条件等效(溶解氧、氧化还原电位、离子浓度、pH等)	(2) 较为准确得到化学、生物规律	
计算模拟	计算平台	水质动态变化模拟	水质参数(余氯、浑浊度、微生物量、污染物浓度等)	较为精确得到水质、水力学、材料力学参数	水质动态变化模拟无法关注管道变化过程, 计算流体力学分析与有限元分析无法关注微生物生长等生物化学过程
		计算流体力学分析	水力学参数(断面流速、压强分布、水头损失等)		
		有限元分析	应力参数(应力分布、材料形变等)		

增加了水体微生物的抗生素耐药性。实物模拟方法能够较真实模拟管道运行,但对装置搭建的空间有较大要求,占地面积一般在 100~1 000 m² 数量级,当采取单向流供水时需水量较大,供水量一般在 0.1~10 L/s 数量级。

3.2 机理等效模拟

(1)水力条件等效模拟。水力条件等效模拟一般使用特制的反应器进行模拟,模拟实际管道中的水流剪切力和停留时间等参数,并能根据模拟所需条件改变流速、流态等水力参数。林文芳等^[75]对常见管道反应模拟装置进行了归纳,常见的模拟装置包括生物膜环形反应器(biofilm annular reactor, BAR)、美国疾控中心反应器(centers for disease control, CDC)、旋转盘式反应器(rotating disc reactor, RDR)、改性 Robbins 反应器(modified Robbins device, MRD)、Propella 反应器等。在具体应用中,王洋等^[76]探究水源切换引起的水质变化时,调制系列梯度配比的新旧水源,并采集管片进行 BAR 反应器试验,得到了相应水质条件下管材内腐蚀规律及管垢铁释放特点。米子龙等^[29]研究 SO₄²⁻浓度和碱度变化对管垢铁释放作用时,采用类似的 BAR 模拟试验,测定出了铁释放量和浑浊度与色度的改变。李晓敏等^[20]使用同样的 BAR 装置探究了水泥砂浆内衬的内腐蚀规律。余春育等^[77]使用 CDC 反应器得出供水管道内壁铝沉积主要成分为无定形氢氧化铝。

(2)化学反应条件等效模拟。在烧杯试验中,研究者能够通过建立管道材料与环境水质成分之间的化学反应条件,可以考察不同水质参数,如溶解

氧、氧化还原电位、金属离子浓度、无机非金属离子浓度、pH 等来模拟内腐蚀过程。张海亚等^[78]通过烧杯试验探明了球墨铸铁管和 304 不锈钢管偶接时的电偶内腐蚀行为,揭示了球墨铸铁管由于较低点位作为阳极,内腐蚀加剧,球墨铸铁阳极的电偶电流密度最大可达到内腐蚀电流密度的 8 倍左右。罗冬浦等^[79]通过烧杯浸泡试验比较了不锈钢管、UPVC 在臭氧下的耐内腐蚀性能。

机理等效模拟的方法占地比实物模拟更小,运行相对简便,易于实验室条件下开展,占地面积一般在 0.1~10 m² 数量级,供水量一般在 0.1 L/s 数量级。水力条件等效模拟能够较为准确地得到模拟水力状态下的微生物相关规律,而化学反应条件则能够得到相应化学规律。机理等效模拟不能完全重现管道内的水力状态和应力状态,是在一定条件下的近似,因此,适用于对研究关注内容有所侧重的模拟试验。机理等效模拟所得到的规律能够用于探究特定水力条件或化学反应条件对腐蚀行为的影响机制,深化对管道内腐蚀的生物化学过程的理解,能够对管道内腐蚀抑制与抗腐蚀新技术的研发起到一定指导性作用。

3.3 计算模拟

(1)水质动态变化模拟。水质动态变化模拟主要考察管道内物质迁移与转化,其中所涉及的生物化学过程与管道内腐蚀密切相关。孙傅等^[80]基于 EPANET-MSX 模拟了给水管网中微生物生长、微生物衰减以及水质参数的动态变化特征。陈国强等^[81]研究了轴扩散效应对管道水流中微生物量模拟的影响,得出流速小于 0.1 m/s 的低流速管道中,

下游节点的水质受到扩散效应的累积影响,并造成污染物浓度逐渐从水源开始向下游累积,到终端时扩散效应达到最大。

(2)计算流体力学模拟。计算流体力学模拟能够反映管道的水力状态,以及内腐蚀的发生对水流的流动状态影响。周煜杰^[82]使用3D扫描仪建立内腐蚀管段内壁模型,并使用ANSYS软件的Fluent模块对流体输送状态进行了计算流体力学模拟,证实了凹凸不平的管瘤增加能量损耗并且所受到的压强较高,以及内腐蚀坑应力集中的现象。翟参^[83]使用同样的计算方法模拟得到发生漏损时管道漏损口形变量大小排序为UPVC>灰口铸铁管>不锈钢管>碳钢管。

(3)有限元分析模拟。有限元分析模拟能够模拟管道在内腐蚀环境中的应力和变形情况,并考虑不同内腐蚀情况下管道的结构弱点和疲劳性能。胡群芳等^[84]采用有限元分析方法对城市大口径供水管道的爆管形成机理、物理过程进行了模拟。王丽萍等^[85]采用有限元分析方法,探明了对球墨铸铁管道在竖向载荷下的接口破损阈值问题。

计算模拟中的水质动态变化模拟可以得到较为准确的水质参数,但是无法关注管材腐蚀本身的特性。计算模拟中的计算流体力学模拟和有限元分析模拟依靠算力资源来得到较为精确的水力学、材料力学参数。这类方法的关注点是与管道腐蚀相关的力学状态,有助于提升在腐蚀管道鉴定、诊断、维护和施工等方面的见解,其模拟结果一般能够较为准确地符合实际工程情况。但计算流体力学、有限元分析模拟等计算模拟方法无法关注微生物生长等生物化学过程,在关注生物内腐蚀的情况的同时,还需要辅以生物化学模拟方法、水质动态变化模拟方法等其他手段。

4 结论与展望

(1)供水管道在其特定工作环境中由于管材自身和城市饮用水物理和生化特点,会累积物理损伤、化学内腐蚀和生物内腐蚀。内衬可以延缓基管内腐蚀,但铁基管材的金属管道例如球墨铸铁管的硅酸盐水泥砂浆内衬内腐蚀失效后,基管也将进一步发生内腐蚀。UPVC等非金属管材的内腐蚀遵循高分子材料的老化内腐蚀规律,区别于金属管道。

(2)供水管道产生的内腐蚀影响管道的正常使

用寿命,因此,需要进行内腐蚀鉴定。直接鉴定是依据内腐蚀的现状形态进行的,包括内腐蚀部位的宏观外观形态与微观化学属性。宏观外观形态上可以通过光学检测技术、电磁波检测技术、声学探听技术和超声波检测技术进行鉴定,微观化学属性上可以从微观形貌和化学成分与晶体结构进行内腐蚀鉴定。间接鉴定是依据内腐蚀的导致的运行影响来进行的,可从管道流体水头损失的增加、管道金属元素释放与水质化学指标改变、水质生物风险增加和饮用水感官指标变化等方面入手鉴定。未来随着传感器科学技术的发展,新的探测和表征方法也可以逐步应用到供水管道内腐蚀鉴定中。

(3)对供水管道产生的内腐蚀规律的探究和明晰,需要借助相应的模拟方法对管道内腐蚀进行模拟,包括实物模拟、机理等效模拟和计算模拟等模拟方法类别。实物模拟采取比例大小的管道模型多应用于中试系统,能够较高还原管网系统的真实运行情况。机理等效模拟既可以使用特制的反应器进行水力条件等效模拟,模拟实际管道中的水流剪切力和停留时间等参数,也可以使用烧杯试验,考察管道材料与环境中水质成分之间的化学反应条件的关系。新模拟方法的开发应侧重或兼顾在管道内腐蚀过程中,管道和水流之间的物理、化学和生物相互作用的呈现。

参考文献

- [1] 童俊. 上海市政自来水实现直饮目标的对策研究[J]. 给水排水, 2020, 56(4): 70-75.
TONG J. Study on the countermeasures of Shanghai municipal tap water to achieve the target of direct drinking[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(4): 70-75.
- [2] 郑丹, 崔鹏飞, 陈永, 等. 2011-2017年我国城镇供水状况宏观数据分析总结[J]. 给水排水, 2020, 56(s1): 400-407.
ZHENG D, CUI P F, CHEN Y, et al. Summary of macro data analysis of urban water supply in China from 2011 to 2017[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(s1): 400-407.
- [3] 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 H, TIAN Y M, ZHANG H Y, et al. Research progress on internal corrosion of iron-metal pipes of water distribution systems[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 70-75.
- [4] 徐菲菲, 贾瑞宝. 城市供水管道腐蚀及铁释放研究进展[J]. 城镇供水, 2013(1): 63-66.
XU F F, JIA R B. Research progress on corrosion and iron release of urban water supply pipelines[J]. City and Town Water

- Supply, 2013(1): 63-66.
- [5] 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.
- [6] 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质稳定性控制研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(1): 69-72, 86.
- DONG Q, ZHAO P, ZHANG H W, 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.
- [7] 孙俊峰, 康雅. 水泥砂浆内衬管通水初期对水质的影响及应对措施[J]. 中国给水排水, 2015, 31(7): 46-49.
- SUN J F, KANG Y. Study on initial impact of cement mortar lining on water quality and its control measures [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(7): 46-49.
- [8] 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.
- LUO H J, TAN L G. Analysis on the water quality pollution and selection of pipeline materials in urban water supply [J]. Water Purification Technology, 2005, 24(6): 68-70.
- [9] 刘昌宏, 张克峰, 杨晓亮, 等. 城市供水管网铁稳定性控制研究进展[J]. 城镇供水, 2016(5): 65-69, 47.
- LIU C H, ZHANG K F, YANG X L, et al. Research progress on iron stability control of urban water supply networks [J]. City and Town Water Supply, 2016(5): 65-69, 47.
- [10] 王亚楠, 汪瑞清, 胡群芳, 等. 城市供水管网管道结构稳定性风险评估模型[J]. 净水技术, 2018, 37(8): 104-110, 115.
- WANG Y N, WANG R Q, HU Q F, et al. Risk assessment model for structural stability of urban water supply pipeline [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(8): 104-110, 115.
- [11] 王飞, 胡智翔, 胡群芳, 等. 城市供水管网运行安全监测技术及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 197-205, 212.
- WANG F, HU Z X, HU Q F, et al. Operation safety monitoring technology and its application in urban water supply network [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(2): 197-205, 212.
- [12] 胡群芳, 张宁, 王飞. 低温条件下城市供水管道冰冻荷载规律研究[J]. 给水排水, 2020, 56(11): 103-110.
- HU Q F, ZHANG N, WANG F. Study on law of frost load on water supply pipeline at low temperature [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(11): 103-110.
- [13] 张稳军, 李瑶, 朱战魁. 供水管网运行安全风险评估温度指标研究[J]. 给水排水, 2020, 56(7): 113-118.
- ZHANG W J, LI Y, ZHU Z K. Study on temperature index of water supply network operation safety risk assessment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(7): 113-118.
- [14] 徐立仁. 基于自动化监测技术在城市供水管网运行管理的应用分析与探讨[J]. 城镇供水, 2023(4): 68-73.
- XU L R. Analysis and discussion on the application of automated monitoring technology in the operation and management of urban water supply pipeline networks [J]. City and Town Water Supply, 2023(4): 68-73.
- [15] 朱娟, 张乔斌, 陈宇, 等. 冲刷腐蚀的研究现状[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(3): 199-210.
- ZHU J, ZHANG Q B, CHEN Y, et al. Progress of study on erosion-corrosion [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 34(3): 199-210.
- [16] ZHENG Y G, YAO Z M, WEI X Y, et al. The synergistic effect between erosion and corrosion in acidic slurry medium [J]. Wear, 1995, 186/187: 555-561. DOI: 10.1016/0043-1648(95)07132-6.
- [17] MENG H, HU X, NEVILLE A. A systematic erosion-corrosion study of two stainless steels in marine conditions via experimental design [J]. Wear, 2007, 263(1/2/3/4/5/6): 355-362. DOI: 10.1016/j.wear.2006.12.007.
- [18] 童祯恭, 刘遂庆, 陶涛. 供水管网中管材对水质影响的探讨[J]. 城市公用事业, 2006(1): 22-24, 45.
- TONG Z G, LIU S Q, TAO T. Probe into effect of pipe materials for water supply pipeline on water quality [J]. Public Utilities, 2006(1): 22-24, 45.
- [19] 洪凯峰, 刘志刚, 侯宗礼, 等. 球墨铸铁管内外防腐涂层的特性及应用[J]. 供水技术, 2007(3): 49-51.
- HONG K F, LIU Z G, HOU Z L, et al. Characteristic and application of internal and external anticorrosive layers for ductile iron pipe [J]. Water Technology, 2007(3): 49-51.
- [20] 李晓敏, 汪隽, 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 X M, WANG J, CHEN C, et al. Chemical stability of desalinated seawater after entering cement mortar lined pipes [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 43-47.
- [21] 林生, 程晓如. 供水系统二次污染的原因与控制方法[J]. 净水技术, 2008, 27(6): 24-29.
- LIN S, CHENG X R. Study on the reasons and the control methods of secondary pollution in water supply system [J]. Water Purification Technology, 2008, 27(6): 24-29.
- [22] 谭平, 吕娜, 张瑞红. 建筑材料[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- TAN P, LÜ N, ZHANG R H. Building materials [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
- [23] 汤玉娟, 左晓宝, 殷光吉, 等. 加速溶蚀条件下铸铁管内衬水泥砂浆的孔结构演变规律[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 239-244, 250.
- TANG Y J, ZUO X B, YIN G J, et al. Evolution of pore

- structure of cement mortar lined in ductile iron pipe under accelerated leachings[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(2): 239-244, 250.
- [24] WAN K, XU Q, LI L, et al. 3D porosity distribution of partly calcium leached cement paste [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 11-15. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.073.
- [25] 张茹芳, 田一梅, 郑波, 等. 高品质再生水管道水泥砂浆内衬腐蚀试验研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2017, 29(5): 469-475.
- ZHANG R F, TIAN Y M, ZHENG B, et al. Corrosion evaluation of cement mortar lining in high quality reclaimed water pipes[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2017, 29(5): 469-475.
- [26] 李欣, 王郁萍, 赵洪宾. 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(5): 592-595.
- LI X, WANG Y P, ZHAO H B. Effect of material quality of pipeline on quality of water supply [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2001(5): 592-595.
- [27] 余洋, 沈承金, 孙恕, 等. 矿粉水泥砂浆抗硫酸盐腐蚀行为研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2014, 26(4): 355-359.
- YU Y, SHEN C J, SUN S, et al. Sulfate corrosion behavior of slag cement mortar [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2014, 26(4): 355-359.
- [28] 成纯赞. 金属管道的腐蚀及防腐对策[J]. *给水排水*, 2004(11): 93-96.
- CHENG C Z. Corrosion and anti-corrosion measures of metal pipelines[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2004(11): 93-96.
- [29] 米子龙, 张晓健, 陈超, 等. 硫酸根和碱度变化对管网铁释放的影响[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(1): 31-34.
- MI Z L, ZHANG X J, CHEN C, et al. Influence of sulphate and alkalinity change on iron release in drinking water distribution system[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(1): 31-34.
- [30] SUN H, SHI B, 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. DOI: 10.1016/j.watres.2017.02.021.
- [31] SARIN P, SNOEYINK V L, BEBEE J, et al. Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes[J]. *Water Research*, 2001, 35(12): 2961-2969.
- [32] LIN J, ELLAWAY M, ADRIEN R. Study of corrosion material accumulated on the inner wall of steel water pipe[J]. *Corrosion Science*, 2001, 43(11): 2065-2081.
- [33] 张心悦, 周克梅, 刘煜, 等. 供水管材对管壁生物膜特性和水质稳定性的影响[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(9): 44-51.
- ZHANG X Y, ZHOU K M, LIU Y, et al. Effect of water supply pipe material on biofilm characteristics and water quality stability [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(9): 44-51.
- [34] 张天天, 邓立群, 辛萍, 等. 氯消毒剂对塑料供水管网已漏管材腐蚀促进研究[J]. *建设科技*, 2019(23): 23-26.
- ZHANG T T, DENG L Q, XIN P, et al. Study on the corrosion promotion of leakage pipes in plastic water supply network by chlorine disinfectant[J]. *Construction Science and Technology*, 2019(23): 23-26.
- [35] 张玲, 刘书明, 胡洪营. 塑料管材输配水过程中有机物释放规律研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(6): 1478-1484.
- ZHANG L, LIU S M, HU H Y. Research of organic compounds migration from polymeric pipes [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(6): 1478-1484.
- [36] 李明. PE 管道的性能及使用范围探析[J]. *全面腐蚀控制*, 2019, 33(1): 65-67.
- LI M. Analysis of the performance and scope of PE pipeline[J]. *Total Corrosion Control*, 2019, 33(1): 65-67.
- [37] 张志浩. 聚乙烯管道温度应力分析及应对措施[J]. *给水排水*, 2017, 53(9): 100-102.
- ZHANG Z H. Temperature stress analysis and response measures for polyethylene pipelines[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(9): 100-102.
- [38] LIU S, GUNAWAN C, BARRAUD N, et al. Understanding, monitoring, and controlling biofilm growth in drinking water distribution systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17): 8954-8976.
- [39] BERRY D, XI C, RASKIN L. Microbial ecology of drinking water distribution systems [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2006, 17(3): 297-302.
- [40] JIN J, WU G, ZHANG Z, et al. Effect of extracellular polymeric substances on corrosion of cast iron in the reclaimed wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 165: 162-165. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.01.117.
- [41] 靳军涛, 管运涛. 再生水管壁菌株胞外聚合物提取及腐蚀性研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(6): 78-82.
- JIN J T, GUAN Y T. Extraction methods and corrosion characterization of extracellular polymeric substances from strain attached on the reclaimed wastewater pipelines [J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 40(6): 78-82.
- [42] 黄佳佳, 柳景青, 王薇, 等. 实际供水管网管材和余氯浓度对生物膜的影响[J]. *科技通报*, 2014, 30(9): 216-222.
- HUANG J J, LIU J Q, WANG W, et al. Effects of pipe materials and free chlorine on biofilm in drinking water distribution system [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2014, 30(9): 216-222.
- [43] 刘挺, 许萍, 汪慧贞, 等. 给水系统管壁生物膜的形成及控制措施[J]. *给水排水*, 2010, 46(s1): 46-50.
- LIU T, XU P, WANG H Z, et al. Formation and control measures of biofilm on the pipe wall of water supply systems[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 46(s1): 46-50.
- [44] 王薇, 任红星, 胡震超, 等. 管材对供水管网生物膜微生物

- 种群多样性的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3): 699–704.
- WANG W, REN H X, HU Z C, et al. Impact of pipe materials on bacterial population diversity in drinking water biofilm[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3): 699–704.
- [45] QING L J, FENG L Z, KE L, et al. Effect of flushing on the detachment of biofilms attached to the walls of metal pipes in water distribution systems[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2017, 18(4): 313–328.
- [46] 赖英豪, 陈垚, 蒋彬, 等. 金属给水管道生物膜的形成与控制[J]. 给水排水, 2023, 59(4): 139–148.
- LAI Y H, CHEN Y, JIANG B, et al. Formation and control of biofilm in metal water supply pipeline[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(4): 139–148.
- [47] JIA S, TIAN Y, LI J, et al. Field study on the characteristics of scales in damaged multi-material water supply pipelines: Insights into heavy metal and biological stability [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 424: 127324. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127324.
- [48] CHAKRABORTY A, RODEN E E, SCHIEBER J, et al. Enhanced growth of *Acidovorax* sp. strain 2AN during nitrate-dependent Fe(II) oxidation in batch and continuous-flow systems [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(24): 8548–8556.
- [49] DONG Y, JIANG B, XU D, et al. Severe microbiologically influenced corrosion of S32654 super austenitic stainless steel by acid producing bacterium *Acidithiobacillus caldus* SM-1 [J]. Bioelectrochemistry, 2018, 123: 34–44. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2018.04.014.
- [50] 牛璋彬, 王洋, 张晓健, 等. 给水管网中管内壁腐蚀管垢特征分析[J]. 环境科学, 2006(6): 1150–1154.
- NIU Z B, WANG Y, ZHANG X J, et al. Analysis of the characteristics of corrosion scale in drinking water distribution systems[J]. Environmental Science, 2006(6): 1150–1154.
- [51] HAWARI A, ALAMIN M, ALKADOUR F, et al. Automated defect detection tool for closed circuit television (CCTV) inspected sewer pipelines [J]. Automation in Construction, 2018, 89: 99–109. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.01.004.
- [52] 冯宇希, 范高哲, 张海亚. 南方某市供水管网水质问题区域水质特征解析[J]. 给水排水, 2018, 54(3): 111–116.
- FENG Y X, FAN G Z, ZHANG H Y. Analysis of water quality characteristics in areas with frequent water quality problems in a city of south China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(3): 111–116.
- [53] 廖军, 耿冰, 韩冰, 等. 供水管网检测新技术[J]. 净水技术, 2018, 37(s1): 158–163.
- LIAO J, GENG B, HAN B, et al. Innovative technologies for inspecting water distribution systems [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(s1): 158–163.
- [54] 李宁, 王晓东, 惠雨乔, 等. 排水管道阻塞辨识定位和供水管网漏损技术及应用现状分析[J]. 给水排水, 2022, 58(s1): 1074–1082.
- LI N, WANG X D, HUI Y Q, et al. Identification and location of drainage pipeline blockage and leakage technology of water supply network and analysis of its application status[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(s1): 1074–1082.
- [55] LIU Z, KLEINER Y. State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes [J]. Measurement, 2013, 46(1): 1–15.
- [56] 王五平, JACK E. 大口径输水管道自由浮游式检漏系统[J]. 给水排水, 2009, 45(7): 114–116.
- WANG W P, JACK E. A free-swimming leak detection system for large diameter water transmission pipeline [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(7): 114–116.
- [57] 黄纯凯, 赵鹏, 张宏伟, 等. 给水管道腐蚀管垢的特征分析[J]. 给水排水, 2011, 47(9): 155–159.
- HUANG C K, ZHAO P, ZHANG H W, et al. Analysis of the characteristics of corrosion scale in water supply pipe [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(9): 155–159.
- [58] 廖丽妃, 胡学香, 胡春, 等. 供水管网管垢的特征及其对水质的影响研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(15): 47–50.
- LIAO L F, HU X X, HU C, et al. Characterization of corrosion scales in water distribution system and their effect on water quality[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(15): 47–50.
- [59] YANG F, SHI B, GU J, et al. Morphological and physicochemical characteristics of iron corrosion scales formed under different water source histories in a drinking water distribution system[J]. Water Research, 2012, 46(16): 5423–5433.
- [60] 林明利, 张全. 水源切换条件下城市供水管网适应性评估方法及应用[J]. 给水排水, 2015, 51(5): 98–102.
- LIN M L, ZHANG Q. Evaluation method for urban municipal water supply network adaptability during water source switching and its application[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(5): 98–102.
- [61] 陈跃, 赵明, 袁一星. 给水管内“生长环”的危害及去除方法研究[J]. 给水排水, 2009, 45(12): 112–115.
- CHEN Y, ZHAO M, YUAN Y X. Study on "growth ring" and its removing methods in water distribution network[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(12): 112–115.
- [62] 谭浩强, 何文杰, 韩宏大, 等. 水力条件对供水管网铁释放的影响研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(3): 56–58.
- TAN H Q, HE W J, HAN H D, et al. Effect of hydraulic conditions on iron release in water distribution system[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(3): 56–58.
- [63] 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(6): 32–33.

- YUAN Y X, ZHAO M. Causes and hazards of rust and scale in water supply pipelines [J]. *China Water & Wastewater*, 1998 (6): 32-33.
- [64] 齐晶瑶, 李欣, 赵洪宾. 关于供水管道内余氯消耗机理的探讨[J]. *给水排水*, 2000(8): 66-69.
- QI J Y, LI X, ZHAO H B. On the mechanism of free chlorine consumption in pipeline [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2000(8): 66-69.
- [65] 郭诗文, 李聪, 王子龙, 等. 给水管壁腐蚀对余氯衰减的影响[J]. *给水排水*, 2012, 48(5): 148-150.
- GUO S W, LI C, WANG Z L, et al. Effect of water supply pipe wall corrosion on chlorine decay [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 48(5): 148-150.
- [66] 赵志领, 赵洪宾, 何文杰, 等. 天津市给水管网余氯衰减模型研究[J]. *给水排水*, 2006(5): 36-39.
- ZHAO Z L, ZHAO H B, HE W J, et al. Modeling of chlorine decay in water distribution system in Tianjin [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006(5): 36-39.
- [67] LEHTOLA M J, MIETTINEN I T, KEINÄNEN M M, et al. Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes [J]. *Water Research*, 2004, 38(17): 3769-3779.
- [68] 孙慧芳, 石宝友, 王东升. 供水管网内壁生物膜的特征及其对水质的影响[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(21): 40-45.
- SUN H F, SHI B Y, WANG D S. Characteristics of biofilm in water distribution system and its influence on water quality [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(21): 40-45.
- [69] 姜文超, 蒋晖, 吴津津, 等. 腐蚀铸铁管中饮用水水质变化规律试验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(6): 117-121.
- JIANG W C, JIANG H, WU J J, et al. Experimental study on quality variation of drinking water in corroded unlined iron pipes [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(6): 117-121.
- [70] 吴贤格, 徐显干, 李宁湘, 等. 粒状活性炭在管道分质供水口感改善中的作用研究[J]. *给水排水*, 2005(8): 37-40.
- WU X G, XU X G, LI N X, et al. Taste improvement of dual tube supplying water using grain activated carbon [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2005(8): 37-40.
- [71] 肖伟民, 林耀军, 罗冬浦, 等. 饮用水不同类型消毒剂对分质供水管材溶蚀作用研究[J]. *给水排水*, 2004(1): 25-28.
- XIAO W M, LIN Y J, LUO D P, et al. Dissolution effects on different disinfectants to the pipe material in dual water system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2004(1): 25-28.
- [72] 周昭彦, 胡必杰, 陶黎黎, 等. 中试循环输水管道系统中建立嗜肺军团菌生物膜[J]. *中华医院感染学杂志*, 2010, 20(10): 1376-1379.
- ZHOU Z Y, HU B J, TAO L L, et al. Biofilm formation of *Legionella pneumophila* in a pilot-scale water re-circulation system [J]. *Chinese Journal of Nosocomiology*, 2010, 20(10): 1376-1379.
- [73] 周昭彦, 胡必杰, 于玲玲, 等. 3种方法对供水系统嗜肺军团菌、阿米巴原虫及生物膜消毒效果的比较[J]. *中华医院感染学杂志*, 2010, 20(12): 1657-1660.
- ZHOU Z Y, HU B J, YU L L, et al. Comparison of disinfection effects of three methods to *Legionella*, biofilm and *Acanthamoeba* in water supply system [J]. *Chinese Journal of Nosocomiology*, 2010, 20(12): 1657-1660.
- [74] ZHANG J, LI W, CHEN J, et al. Effect of hydraulic conditions on the prevalence of antibiotic resistance in water supply systems [J]. *Chemosphere*, 2019, 235(3): 54-64.
- [75] 林文芳, 余志晟, 陈曦, 等. 给水管网生物膜反应器及分子生物学研究方法进展[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(6): 71-78.
- LIN W F, YU Z S, CHEN X, et al. Progress on research methods of biofilm reactor and molecular biology in drinking water distribution [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 35(6): 71-78.
- [76] 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.
- [77] 余春育, 白居易, 柳剑男, 等. 铜质给水管中铝垢的形成与转化机制研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(19): 17-22.
- YU C Y, BAI J R, LIU J N, et al. Formation and transformation characteristics of aluminum scales in copper drinking water distribution pipeline [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(19): 17-22.
- [78] 张海亚, 刘迪波, 李舒阳, 等. 供水管道中球墨铸铁和304不锈钢的电偶腐蚀特性[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(17): 37-42.
- ZHANG H Y, LIU D B, LI S Y, et al. Galvanic corrosion behavior between ductile iron and 304 stainless steel in water distribution system [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(17): 37-42.
- [79] 罗冬浦, 肖伟民, 林耀军, 等. 臭氧对供水管材的溶蚀作用[J]. *净水技术*, 2004, 23(3): 21-23.
- LUO D P, XIAO W M, LIN Y J, et al. An investigation of dissolution of ozone on water distribution pipes [J]. *Water Purification Technology*, 2004, 23(3): 21-23.
- [80] 孙傅, 陈吉宁, 曾思育. 基于EPANET-MSX的多组分给水管网水质模型的开发与应用[J]. *环境科学*, 2008(12): 3360-3367.

(下转第69页)

- [12] 孙彦敏, 高惠敏, 徐春祥, 等. 环境中微塑料检测技术研究进展[J/OL]. 生态与农村环境学报, 2022; 1-11 (2022-11-25) [2026-06-14]. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0833>.
- SUN Y M, GAO H M, XU C X, et al. Research progress of microplastics detection methods in environment[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022; 1-11 (2022-11-25) [2026-06-14]. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0833>.
- [13] 李红岩, 张海峰, 李洁, 等. 饮用水中微塑料污染研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(7): 7-12.
- LI H Y, ZHANG H F, LI J, et al. Review of microplastics pollution in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(7): 7-12.
- [14] 许龙, 王志峰. 某水厂中微塑料的赋存及去除特性[J]. 净水技术, 2020, 39(7): 109-113, 120.
- XU L, WANG Z F. Occurrence and removal of microplastics in a water treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(7): 109-113, 120.
- [15] 王赛, 张岚, 陈永艳, 等. 饮用水处理技术去除微塑料的效果及进展[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 20-25, 61.
- WANG S, ZHANG L, CHEN Y Y, et al. Effect and progress of microplastics removal in drinking water treatment process[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 20-25, 61.
- [16] 周惠林, 杨卫民, 李好义. 医用口罩过滤材料的研究进展[J]. 纺织学报, 2020, 41(8): 158-165.
- ZHOU H L, YANG W M, LI H Y. Research progress of filtering material for medical mask[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(8): 158-165.
- [17] FAN Y F, ZHENG J L, DENG L G, et al. Spatiotemporal dynamics of microplastics in an urban river network area[J]. Water Research, 2022, 212: 118116. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118116.
- [18] PRIYANSA G, MAHUA S, CHAYANIKA R, et al. Spatial and seasonal variation of microplastics and possible sources in the estuarine system from central west coast of India[J]. Environmental Pollution, 2021, 288: 117665. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117665.
- [19] LI S, WANG Y, LIU L, et al. Temporal and spatial distribution of microplastics in a coastal region of the Pearl River Estuary, China[J]. Water, 2021, 13(12): 1618. DOI: 10.3390/W13121618.

(上接第 26 页)

- SUN F, CHEN J N, ZENG S Y. Development and application of a multi-species water quality model for water distribution systems with EPANET-MSX[J]. Environmental Science, 2008(12): 3360-3367.
- [81] 陈国强, 龙天渝. 基于欧拉-拉格朗日分裂法的供水管网多组分水质模拟[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 69-74.
- CHEN G Q, LONG T Y. Multicomponent water quality simulation with axial dispersion solved by Eulerian-Lagrangian operator-splitting method in water distribution system[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 69-74.
- [82] 周煜杰. 供水管网中灰口铸铁管的管垢特性与管段力学性状初探[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- ZHOU Y J. Brief research on the pipe scales and the mechanical state of cast iron pipes corrosion in water distribution systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [83] 翟参. 供水管道小孔漏损分析和数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- ZHAI S. Analysis and numerical simulation of small orifice leakage in water supply pipeline[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [84] 胡群芳, 苏航剑, 方宏远, 等. 供水管网大口径管道爆管事件形成机理与精细模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 153-160, 150.
- HU Q F, SU H J, FANG H Y, et al. Dynamic simulation and mechanical analysis of large-diameter water main burst[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2023, 51(2): 153-160, 150.
- [85] 王丽萍, 张宛静, 赵帅, 等. 竖向荷载作用下承插式球墨铸铁供水管道接口破损试验与数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 232-239.
- WANG L P, ZHANG W J, ZHAO S, et al. Experiment and numerical simulation study on socket and spigot joint damage of ductile iron water supply pipeline under vertical loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 232-239.