

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.12.013

铁质金属供水管道的内腐蚀研究进展

郭浩¹, 田一梅², 张海亚³, 李雪¹, 靳亚鹏¹, 尹建华⁴

(1. 自然资源部 天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192; 2. 天津大学 环境科学与工程
学院, 天津 300350; 3. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 4. 天津市中海水处理科技有限
公司, 天津 300192)

摘要: 铁质金属供水管道是我国使用最广泛的供水管材,其腐蚀问题是导致管网漏失和爆裂的主要原因。长期运行过程中,管道内壁腐蚀生成的不规则腐蚀管垢,不仅会降低管网的输送能力,还会发生铁释放导致的“红水”现象,严重影响管网的安全稳定运行。分别从腐蚀研究方法、腐蚀影响因素、腐蚀管垢研究以及非常规水源进入管网引起的腐蚀问题等四个方面,综述了铁质金属供水管道的内腐蚀研究进展,并对目前供水管道腐蚀研究存在的局限性进行了总结,进而提出了面向未来的供水管道腐蚀研究新方法和新思路,以期从本质上掌握铁质供水管道的腐蚀问题及其引起的管网水质恶化的症结,并准确揭示供水管网的水质稳定性控制机制,从而为保证供水管网的安全运行奠定坚实的理论基础。

关键词: 供水管网; 腐蚀; 电化学; 腐蚀垢层

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)12-0070-06

Research Progress on Internal Corrosion of Iron-metal Pipes of Water Distribution Systems

GUO Hao¹, TIAN Yi-mei², ZHANG Hai-ya³, LI Xue¹, JIN Ya-peng¹, YIN Jian-hua⁴

(1. *The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR, Tianjin 300192, China*; 2. *School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China*; 3. *School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 4. *Tianjin Zhonghai Water Treatment Technology Co. Ltd., Tianjin 300192, China*)

Abstract: Iron-metal pipe is the most widely used in water distribution systems (WDS) in China, and its corrosion is the main cause of pipe network leakage and burst. In the process of long-term operation, the irregular corrosion scale produced by the corrosion of the inner wall of the pipe will not only reduce the conveying capacity of the WDS, but also lead to the phenomenon of “red water” caused by iron release, which seriously affects the safe and stable operation of the WDS. This paper respectively reviewed the research progress of internal corrosion of the iron-metal WDS from the following four aspects: the corrosion research methods, corrosion influence factors, pipe corrosion scales research, and the problem of corrosion caused by unconventional water entering the WDS. The limitations of the current WDS corrosion research was summarized, and then new methods and ideas of the WDS corrosion was put

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808158); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(K-JBYWF-2018-CR05)

通信作者: 郭浩 E-mail: tjguohao@163.com

forward, in order to fundamentally control the corrosion problem of the iron-metal WDS, and reveal the cause of the water quality deterioration and the control mechanism of water quality stability. Finally, a solid theoretical foundation was established in order to ensure the safe operation of WDS.

Key words: water distribution systems; corrosion; electrochemistry; corrosion scale

随着我国城市化水平不断提高,供水管网的安全运行日益受到公众的关注。国家住建部发布的《2017年城乡建设统计年鉴》显示,截至2017年底,我国城镇供水管网总长度已达 168×10^4 km。然而,管道腐蚀引起的管网水质恶化,管道泄漏甚至爆裂等供水事故,已经对正常的居民生活和经济活动产生了严重影响。

铸铁管道是最早用于市政供水的金属管道,使用时间已经超过了500年。在我国,既有管道中铸铁管和钢管约占90%以上,新建的供水管网约85%仍采用金属管道。金属供水管道的腐蚀会造成以下危害:第一,导致管壁逐渐变薄,易发生漏损或爆裂;第二,在管道内壁生成腐蚀管垢,降低输水能力,同时增大阻力系数,导致管网运行成本提高;第三,管垢的溶解和释放导致水质恶化。因此,金属供水管道的腐蚀已经成为威胁供水管网安全稳定运行的重要因素之一。分别从腐蚀研究方法、腐蚀影响因素、腐蚀管垢研究以及非常规水源进入管网引起的腐蚀问题等四个方面,对铁质金属供水管道的内腐蚀研究进展进行详细介绍。

1 腐蚀研究方法进展

失重法和电化学方法是两种主要的腐蚀研究手段,国外研究人员对供水管道的腐蚀机理研究主要采用电化学方法。1967年,de Levie首次利用电化学阻抗谱测试技术(EIS)对铸铁给水管的腐蚀问题进行了研究,并建立了铸铁腐蚀的多孔电极模型(Porous Electrode Model)。传统的电化学测试基本在腐蚀介质的浸泡环境下进行,于是部分研究人员开发了旋转圆盘电极(RDE)和旋转圆筒电极(RCE),通过电极旋转来达到工作表面和腐蚀介质的相对流动状态,进而模拟供水管道流动腐蚀环境。Rios等^[1]采用RCE分别对铜、碳钢和304不锈钢在自来水环境中的电化学腐蚀行为进行了研究,结果发现,不同金属的耐蚀性主要与表面腐蚀产物膜的状态有关。

国内对供水管道腐蚀的研究以失重法为主。刘星飞等^[2]采用挂片法,研究了球墨铸铁给水管道的内

腐蚀速率随时间的变化规律,结果表明,自来水环境下球墨铸铁腐蚀速率初期波动较大,并随时间逐步下降,最后趋于稳定,稳定时间约为48 h。随着电化学测试技术的发展,国内研究人员开始将动电位扫描法、极化曲线法及EIS等方法用于腐蚀机理研究。佟慧妍^[3]通过模拟闭塞电池装置研究了铸铁供水管道的腐蚀机理,重点阐述了闭塞水中化学物质的累积与迁移机制,提出了铸铁给水管局部腐蚀机理的概念模型。近年来,笔者所在研究团队通过电化学方法,开展了基于供水管道流动体系下的腐蚀试验研究^[4],原位监测了球墨铸铁、灰口铸铁和碳钢三种给水管材的腐蚀垢层的生长过程,并依据EIS分析,建立了腐蚀垢层的物理模型和等效电路,揭示了腐蚀垢层的生长机理,及其对腐蚀过程的影响机制。

2 腐蚀影响因素研究进展

目前国内外关于供水管道的腐蚀影响因素研究,主要包括温度、水质(氯离子、硫酸根离子、碱度、硬度等)、消毒剂 and 微生物以及水力条件等方面。弗吉尼亚理工大学的研究人员对金属管道腐蚀的影响因素进行了长期系统的研究。Masters等^[5]建立了模拟供水管网装置,研究了消毒剂种类对管道腐蚀的影响规律,结果表明,消毒剂导致铁释放的速度增大,游离氯引起的腐蚀速率大概是氯胺的4倍。浙江大学的王皓昉^[6]通过挂片法对灰口铸铁供水管道的内壁腐蚀进行了研究,分别对pH值、溶解氧浓度、余氯浓度、温度和氯化钠浓度等影响因素进行模拟试验。结果表明,灰口铸铁的腐蚀速率与溶解氧浓度、余氯浓度、氯化钠浓度和温度呈正相关,而与pH呈负相关;采用灰色关联分析法可以得到影响因素的重要性排序:余氯 > 氯化钠 > 溶解氧 > 温度 > pH。

以上的研究内容主要涉及供水管道的水质因素,限于试验条件,国内外还未出现针对影响管道腐蚀的水力因素开展的系统研究。笔者^[7]将电化学测试装置和循环管路相结合,引入水质更新系统,建立了流动腐蚀模拟监测系统,通过电化学测试,揭示

了流速对球墨铸铁腐蚀速率、腐蚀垢层结构和阴阳极反应过程的影响规律。结果表明,球墨铸铁在自来水腐蚀环境下的腐蚀行为包括初始期、发展期和稳定期3个阶段;流速与腐蚀速率基本呈正相关,但流速增大对阳极反应影响有限,主要促进了阴极反应。

3 管道腐蚀垢层研究进展

金属供水管道一旦受到输送水体的腐蚀,均能在管道金属基体和输送介质之间生成管道腐蚀产物,并与水中的沉积物结合形成不规则的腐蚀管垢。腐蚀管垢是导致管网铁释放的根本原因,与此同时,腐蚀管垢还直接参与供水管网中重金属离子和消毒副产物等微量污染物的沉积和释放过程,其组成和结构的稳定性直接关系到供水管网的水质安全。

目前,国内外对于供水管道腐蚀垢层的研究主要集中在以下几个方面:第一,对于老旧管道腐蚀管垢的组成和结构的静态分析;第二,不同影响因素对腐蚀管垢组成和结构变化的作用机理;第三,腐蚀管垢的溶解或脱落对输送水体造成的影响。

3.1 腐蚀管垢的结构和组成

国内外研究人员主要通过采集老旧供水管道的腐蚀管垢样品进行理化特征分析。Swietlik等^[8]通过对腐蚀管垢进行不同条件的预处理,采用XRD方法检测出潮湿垢样中含有大量不稳定态的绿锈成分,而这些绿锈在垢样的干燥过程中会转化为更稳定的 α -FeOOH和 γ -FeOOH。此研究为丰富供水管道的垢样分析方法提供了新的思路。牛璋彬等^[9]也对给水铸铁管和镀锌钢管的管垢进行了分析,发现平滑致密的外层管垢主要含 α -FeOOH和 γ -FeOOH等三价铁化合物,而多孔密实的内衬管垢主要含 Fe_3O_4 等二价铁与三价铁共同存在的化合物。此外,Yang等^[10]通过对不同通水历史的腐蚀管垢组成的分析与研究,发现磁铁矿和针铁矿是腐蚀管垢的主要组成成分,但磁铁矿与针铁矿的质量比(M/G)受管垢结构和水源条件的影响而出现显著差异。致密厚实的管垢或者管垢硬壳层的 M/G (>1.0)较高,而薄层腐蚀管垢中不含磁铁矿或者 M/G 比值很低,因此可以利用 M/G 比值对不同水源条件下形成的腐蚀管垢进行特征识别和性能评价。Li等^[11]分别选取20多年管龄的无衬里铸铁管和镀锌铸铁管制成一段组合管段,研究了腐蚀管垢的理化特性及其对水质变化的影响。结果表明,两种管

材的腐蚀管垢理化特性差异明显,但均呈高度无定形态;尽管镀锌涂层具有很高的锌释放潜力,但它的保护作用使得镀锌铸铁管的水质稳定性更好。分析结果还显示,腐蚀管垢的复杂组成和两种管材接口处焊缝结构的破坏能够降低水质的稳定性。

3.2 腐蚀管垢影响因素研究

目前国内外开展了关于水质条件、生物膜以及消毒剂等因素对腐蚀管垢的影响研究。Li等^[12]分别研究了输送地下水和地表水的供水管网的腐蚀管垢特性,结果发现,输送地下水的管道容易生成以 α -FeOOH为主的松散的腐蚀产物,而输送地表水的管道则容易形成以 α -FeOOH、 Fe_3O_4 和 CaCO_3 为主的致密腐蚀管垢。研究还发现,生物膜中与铁循环有关的硝酸盐还原菌在 Fe_3O_4 和腐蚀垢层的形成中起着重要作用。Wang等^[13]采用环状反应器研究了 O_3/Cl_2 消毒对给水系统腐蚀管垢的影响,结果发现,经 O_3/Cl_2 消毒处理的管垢生物膜中铁氧化细菌和铁还原细菌含量越高,腐蚀管垢中 Fe_3O_4 的含量则越大,比单独采用 Cl_2 消毒处理形成的腐蚀管垢更稳定,因此 O_3/Cl_2 组合消毒方式可以有效抑制给水管道的腐蚀和铁释放。

3.3 腐蚀管垢引起的金属污染物的释放研究

腐蚀管垢的溶解和脱落主要引起铁释放,导致“红水”等水质污染现象,Laskowskia等^[14]将铸铁腐蚀管垢封装在试验管段中模拟实际的腐蚀管道,分别对停滞和流动状态下管垢对水质的影响规律进行了研究。结果显示,在停滞期模拟管网中的铁浓度均有增加,浑浊度增加,氧和硝酸盐浓度下降;而在流动条件下,水质则无明显变化。

国内清华大学的研究人员^[15]对水源切换引起的供水管道的铁释放问题进行了研究,通过实际管网水质监测以及实验室模拟管段反应器试验,系统研究了水质、消毒方式、微生物作用等因素对铁释放的影响机制,并提出了有针对性的管网铁释放控制对策,主要包括:水源调配技术、酸碱调节技术(pH值和碱度)、氧化还原电位(ORP)调节技术以及缓蚀剂投加技术等,较全面地构建了应对水源切换导致的水质化学组分突变引发的管网铁释放的控制技术体系。Hu等^[16]研究了曾分别输送过混合水、地表水和地下水的铸铁供水管道铁释放受水质变化的影响规律,结果表明, Cl^- 或 SO_4^{2-} 浓度的增加促进了铁的释放,而碱度和钙硬度则呈相反的趋势,消毒

剂由游离氯变为一氯胺对铁释放有轻微的抑制作用,三种管道中溶解氧的消耗量与铁的释放量高度相关。

近年来,在供水管道铁释放研究的基础上,研究人员对腐蚀管垢中富集的其他污染物的释放行为进行了深入研究。Trueman 等^[17]研究了腐蚀给水管中铅释放和铁释放之间的关系,结果发现,当腐蚀管垢中的铅和 Fe_3O_4 短路形成原电池时,铅的释放速率会出现明显增加,推断铅是随着管垢中铁的胶体颗粒溶解进入饮用水中。

中科院生态环境中心的研究人员对供水管网腐蚀管垢的金属污染物释放也进行了深入研究,其中, Sun 等^[18]分别研究了不同水源(地下水和地表水)条件下硫酸盐对腐蚀管垢中微量重金属释放过程的影响,结果表明,硫酸盐含量的增加可引发锰、镍、铜、铅、铬、砷等重金属的释放,但随着时间的推移释放量逐渐减少,地下水比地表水管道中重金属的释放更为严重。Li 等^[19]通过对实际供水管网的连续监测,研究了管垢中金属污染物的释放行为,结果表明,冲刷过程中腐蚀管垢的锰和铝比铁更容易释放回原水中,且颗粒态的锰和铝存在明显的共释放行为。因此,为了应对供水管网中的金属污染物释放有必要在水处理过程中同时控制锰和铝的含量。

4 非常规水源进入供水管网引起的腐蚀

国内外对非常规水源进入供水管网引起的腐蚀研究主要集中在海水淡化水和地表水、地下水等水源掺混进入供水管网引起的铁释放问题,以及掺混水对于管垢形貌影响的定性分析。

Liu 等^[20]研究了淡化水与自来水掺混对铁腐蚀和铁释放的影响,结果表明,在掺混水中占比较高的淡化水会导致更脆弱的腐蚀表面、较低的铁氧化产物保留率,以及在大体积水中释放更大的铁颗粒。Choi 等^[21]通过实验室循环管路试验,研究了纳滤处理水与混凝、沉淀、过滤处理水掺混后的腐蚀特征,结果表明,配水时减少纳滤处理水,腐蚀程度明显降低;最后,提出了反映掺混比和纳滤膜性能的朗格利尔指数模型,用于指导降低供水管网系统腐蚀的风险。

国内的学者也对此类问题进行了深入研究。黄纯凯^[22]通过动态管网的模拟试验,改变自来水和淡化水的掺混比、pH 值等水质指标,重点分析水质指标对总铁含量的影响。结果表明,铁的释放量与停

留时间和水温呈正相关,与 pH 值、碱度和硬度呈负相关。Mi 等^[23]利用模拟管段反应器,研究了含有不同氯浓度的海水淡化水对管垢中铁释放的影响,提出了氯化物环境下的铁释放机理,认为氯离子可以穿透并破坏管壁上存在的稳定腐蚀垢层,并建议在既有铸铁管道中加入海水淡化水的水质目标:保持 pH 值 >7.7 ,碱度超过 80 mg/L ,硬度超过 80 mg/L ,并提供 $0.25 \sim 0.50 \text{ mg/L}$ 的混合磷酸盐抑制剂。

5 结语

① 近年来,在管网改造工程中,大多采用带水泥砂浆内衬的球墨铸铁管代替老旧的灰口铸铁管、镀锌钢管以及无内衬的球墨铸铁管。目前国内外对水泥砂浆内衬腐蚀的研究多采用浸泡或者循环冲刷试验,主要考虑不同水源(自来水、再生水、海水淡化水等)和水质因素对水泥砂浆的溶蚀和脱钝过程的影响规律,大多为定性研究,并未涉及水泥砂浆内衬的腐蚀动力学过程。虽然有研究人员采用水泥砂浆模拟孔隙液作为腐蚀介质,进一步还原了内衬覆盖下的腐蚀介质环境,但与实际内衬覆盖条件下的管道腐蚀过程存在较大差异。因此,通过适当研究手段原位表征水泥砂浆内衬的溶蚀、脱钝、局部失效,直至内衬脱落全腐蚀周期的时空演化规律,以及各腐蚀阶段下球墨铸铁的化学/电化学腐蚀行为特征是今后的一个研究重点。

② 目前对于金属供水管道的腐蚀研究大多采用基于失重法的模拟浸泡或者管路循环试验,以及传统的宏观电化学测试技术,主要适用于金属的全面腐蚀行为和机理研究。但实际供水管道的腐蚀主要是由于内衬失效引起的局部腐蚀,其核心反应为腐蚀管垢界面的微观电化学和物质扩散等局部腐蚀过程,尚未实现对腐蚀管垢/水界面的电化学反应过程的实时原位观测和局部腐蚀动力学研究。微区电化学测试技术基于扫描探针,具有高空间分辨率,能够区分材料不同区域电化学特性差异,能够探测材料/溶液界面的电化学反应过程,尤其能够在溶液体系中对研究系统进行实时、现场、三维空间观测,可以实现腐蚀形貌的扫描成像、腐蚀界表面反应活性监测及局部腐蚀动力学研究。因此,微区电化学测试技术的诸多优点使其在以局部腐蚀为本质特征的腐蚀管垢生长机理研究中具有良好的适用性和优势,可以为金属管道腐蚀机理研究提供新的试验手段支撑。

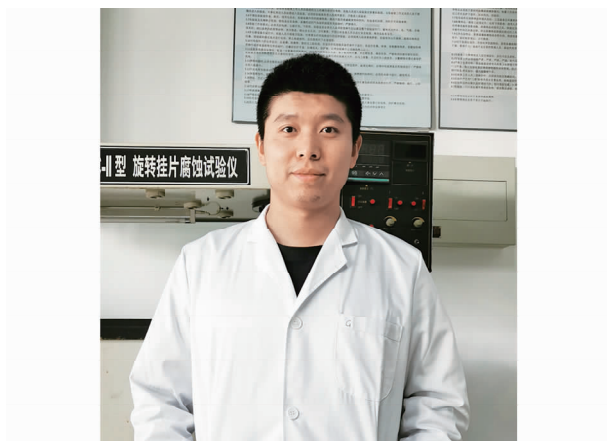
③ 目前对于供水管道腐蚀机理的研究主要限定在宏观和微观两个尺度下进行。第一,在宏观尺度下,腐蚀机理研究主要集中在管网水质参数对于腐蚀过程的影响、基于统计学规律的管网腐蚀速率的数学模型及水质调控等措施对水质进行稳定性控制等方面;第二,在微观尺度下,研究内容主要包括引起腐蚀的化学、电化学反应过程,以及管道腐蚀垢层的成分和形貌分析等几个方面。无论是宏观尺度还是微观尺度的研究,都试图通过定性和定量的方式对管网腐蚀做出清晰的说明,但是管道腐蚀是一个结合微观(化学/电化学反应过程等)和宏观变化(水流冲刷、水质波动等)的耦合过程,仅仅从微观或者宏观的角度难以真正把握腐蚀的真实全过程。因此,对于管道腐蚀机理研究,不仅需要依赖于微观和宏观两个层次上的正确认识,更需要了解微观和宏观层次之间的耦合作用机制,关联微尺度和宏尺度的介尺度科学有望在此问题上发挥创造性作用。

④ 目前国内外关于供水管网水质稳定性的理论研究并未取得突破性进展,仍基于传统的以碳酸钙溶解度为基础的稳定性指数进行判定,如Langelier饱和指数、Ryznar指数和碳酸钙沉淀势(CCPP)等。此类稳定性指数虽能有效判断是否为碳酸钙饱和水,但针对带水泥砂浆内衬的球墨铸铁管,其内衬属于硅酸盐体系,导致传统的稳定性指数适用性较差。特别是对于已经形成腐蚀管垢的既有供水管道而言,输配水体的稳定性既与水体本身性质有关,还与腐蚀管垢特征及稳定状态密切相关。单纯从水质本身的化学稳定性研究,而不考虑腐蚀管垢的实际状态,无法揭示供水管网铁释放的根本原因和作用机理。因此,建立基于腐蚀管垢状态评价的供水管网水质稳定性判定理论,可以从本质上掌握腐蚀管垢引起的管网水质恶化的症结,对于保证供水管网的安全运行意义重大。

参考文献:

- [1] Rios J F, Calderón J A, Nogueira R P. Electrochemical behavior of metals used in drinking water distribution systems: A rotating cylinder electrode's study [J]. Corrosion, 2013, 69(9): 875–885.
- [2] 刘星飞, 田一梅, 郭浩, 等. 球墨铸铁给水管内腐蚀实验研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(5): 459–462.
- [3] 佟慧妍. 给水管网堵塞水中铸铁腐蚀机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [4] 郭浩. 供水管道电化学腐蚀机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [5] Masters S, Wang H, Pruden A, et al. Redox gradients in distribution systems influence water quality, corrosion, and microbial ecology[J]. Water Res, 2015, 68: 140–149.
- [6] 王皓昉. 供水灰口铸铁管内壁初始腐蚀影响因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [7] 郭浩, 李雪, 刘星飞, 等. 流速对球墨铸铁供水管道腐蚀行为的影响机理[J]. 材料保护, 2018, 51(9): 40–44, 93.
- [8] Swietlik J, Raczky-Stanislawiak U, Piszora P, et al. Corrosion in drinking water pipes: The importance of green rusts[J]. Water Res, 2012, 46(1): 1–10.
- [9] 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, 27(6): 1150–1154.
- [10] Yang F, Shi B Y, Gu J N, et al. Morphological and physicochemical characteristics of iron corrosion scales formed under different water source histories in a

- drinking water distribution system [J]. Water Res, 2012,46(16):5423-5433.
- [11] Li M J, Liu Z W, Chen Y C, *et al.* Characteristics of iron corrosion scales and water quality variations in drinking water distribution systems of different pipe materials [J]. Water Res, 2016, 106:593-603.
- [12] Li X X, Wang H B, Hu C, *et al.* Characteristics of biofilms and iron corrosion scales with ground and surface waters in drinking water distribution systems [J]. Corros Sci, 2015, 90:331-339.
- [13] Wang H B, Hu C, Zhang S N, *et al.* Effects of O_3/Cl_2 disinfection on corrosion and opportunistic pathogens growth in drinking water distribution systems [J]. J Environ Sci, 2018, 73:38-46.
- [14] Laskowska T, Swietlika J, Raczky-Stanislawiaka U, *et al.* A cast iron filings based model for dynamic investigation of corrosion and its compatibility with the real water distribution network [J]. Desalin Water Treat, 2015, 57(18):8139-8151.
- [15] 米子龙. 水源切换对给水管网水质铁稳定的影响及控制特性研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- Mi Zilong. Control Technology and Research Progress on Influence of Water Source Switch on Iron Release in Water Supply Network [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese).
- [16] Hu J, Dong H Y, Xu Q, *et al.* Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switching strategy [J]. Water Res, 2018, 129:428-435.
- [17] Trueman B F, Gagnon G A. Understanding the role of particulate iron in lead release to drinking water [J]. Environ Sci Technol, 2016, 50(17):9053-9060.
- [18] Sun H F, Shi B Y, Fan Y, *et al.* Effects of sulfate on heavy metal release from iron corrosion scales in drinking water distribution system [J]. Water Res, 2017, 114(5):69-77.
- [19] Li G W, Ding Y X, Xu H F, *et al.* Characterization and release profile of (Mn, Al)-bearing deposits in drinking water distribution systems [J]. Chemosphere, 2018, 197(6):73-80.
- [20] Liu H Z, Schonberger K D, Peng C Y, *et al.* Effects of blending of desalinated and conventionally treated surface water on iron corrosion and its release from corroding surfaces and pre-existing scales [J]. Water Res, 2013, 47(11):3817-3826.
- [21] Choi J, Choi B G, Hong S. Effects of NF treated water on corrosion of pipe distribution system and its implications to blending with conventionally treated water [J]. Desalination, 2015, 360:138-145.
- [22] 黄纯凯. 既有给水管网调配淡化海水水质稳定性控制研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- Huang Chunkai. Study on the Stability Control of Desalination Water Quality in Existing Water Supply Pipeline Network [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012 (in Chinese).
- [23] Mi Z L, Zhang X J, Chen C. Iron release in drinking water distribution systems by feeding desalinated seawater: Characteristics and control [J]. Desalin Water Treat, 2016, 57(21):9728-9735.



作者简介:郭浩(1987-),男,河北鹿泉人,博士,工程师,研究方向为供水管道腐蚀与防护。

E-mail: tjguohao@163.com

收稿日期:2019-11-12