

水源与饮用水保障

许航, 王晴, 胡天龙, 等. 原水输水管道水泥砂浆内衬腐蚀的机理及影响因素[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 44-59.

Xu H, Wang Q, Hu T L, et al. Mechanism and influencing factors of corrosion on cement mortar linings for raw water diversion pipelines [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 44-59.

原水输水管道水泥砂浆内衬腐蚀的机理及影响因素

许航^{1,2,*}, 王晴^{1,2}, 胡天龙^{2,3}, 王月婷^{1,2}, 郭雅彬^{1,2}

(1. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学苏州研究院, 江苏苏州 215100; 3. 河海大学水科学研究院, 江苏南京 211106)

摘要 【目的】采用水泥砂浆内衬的球墨铸铁管被广泛应用于城市管网中, 然而现有研究多聚焦于供水管道和再生水管道的金属腐蚀。故本文深入探究原水管道中水泥砂浆内衬的腐蚀行为特征及铁释放行为机制, 并为原水输送过程中水质保障提供理论依据。【方法】本文以输送地表水、地下水和混合水的管段为研究对象, 通过改进型生物膜环形反应器模拟输送不同水质原水的老旧管道, 运用极化曲线及电化学阻抗谱分析探究氯离子(Cl^-)、硫酸根离子(SO_4^{2-})、碱度和硬度在不同浓度下对于腐蚀垢层的影响。结合电化学与水质分析结果, 揭示不同影响因素下球墨铸铁管水泥砂浆内衬的腐蚀行为和铁释放情况。【结果】 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度增长会增强管道腐蚀, 导致抗腐蚀性能降低, 同时促进铁的释放。但当 Cl^- 、 SO_4^{2-} 质量浓度分别提升至120、519 mg/L时, 腐蚀倾向减弱, 垢层的耐腐蚀性能增加。另外, 碱度和硬度在较高水平下可以提高腐蚀垢层的抗腐蚀性能。值得注意的是, 碱度从100 mg/L增至300 mg/L时, 总铁平均释放质量浓度由34 mg/L减小至14 mg/L。而硬度在100~300 mg/L时, 总铁质量浓度保持在0.5~1.0 mg/L, 且腐蚀倾向呈现出先减弱后增强的趋势。【结论】为有效抑制原水输送管道中水泥砂浆内衬腐蚀并防止水质恶化, 本文提出 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度应维持在较低范围内, 同时适当提高碱度与硬度。

关键词 模拟原水管道 水泥砂浆内衬 腐蚀 铁释放 电化学

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)02-0044-16

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.005

Mechanism and Influencing Factors of Corrosion on Cement Mortar Linings for Raw Water Diversion Pipelines

Xu Hang^{1,2,*}, Wang Qing^{1,2}, Hu Tianlong^{2,3}, Wang Yueting^{1,2}, Guo Yabin^{1,2}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Suzhou Research Institute of Hohai University, Suzhou 215100, China;

3. Institute of Water Science and Technology of Hohai University, Nanjing 211106, China)

Abstract [Objective] The utilization of ductile iron pipes with cement mortar linings is prevalent in urban pipeline networks. However, existing studies have primarily focused on the metallic corrosion of water supply and reclaimed water pipelines. Therefore, this paper aims to elucidate the corrosion characteristics and iron release mechanisms of cement mortar linings in raw water pipelines, thereby providing a theoretical basis for ensuring water quality during raw water transmission. [Methods] This paper introduced investigation of pipelines sections transporting surface water, groundwater, and mixed water, simulating the aging pipelines carrying raw water of varying qualities via an improved biofilm annular reactor. Polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy were employed to explore the effects of chloride ions (Cl^-), sulfate ions (SO_4^{2-}), alkalinity, and hardness at various concentrations on the

[收稿日期] 2025-06-13

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(51978239); 苏州市水利水务科技项目(2024005)

[通信作者] 许航(1981—), 男, 教授, 研究方向为原水管道输送、饮用水安全保障, E-mail: xuhang810826@163.com。

corrosion scales. Combining electrochemical and water quality analyses results, this paper revealed the corrosion behaviors of cement mortar linings in ductile iron pipes and the associated iron release under various influencing factors. [**Results**] Increasing concentrations of Cl^- and SO_4^{2-} accelerated the corrosion tendency of the pipeline, reduced its corrosion resistance, and promoted iron release. However, when the concentrations of Cl^- and SO_4^{2-} were increased to 120 mg/L and 519 mg/L, respectively, the corrosion tendency diminished, and the corrosion resistance of the scale was improved. Moreover, higher levels of alkalinity and hardness could enhance the corrosion resistance of the corrosion scales. Notably, as alkalinity increased from 100 mg/L to 300 mg/L, the average total iron release concentration decreased from 34 mg/L to 14 mg/L. Conversely, when hardness varied between 100 mg/L and 300 mg/L, the total iron concentration remained within the range from 0.5 mg/L to 1.0 mg/L, and the corrosion tendency exhibited a trend of first decreasing and then increasing. [**Conclusion**] To effectively mitigate the corrosion of cement mortar linings in raw water transport pipelines and prevent water quality deterioration, this paper proposes that concentrations of Cl^- and SO_4^{2-} should be maintained within lower ranges, while alkalinity and hardness can be moderately increased.

Keywords simulated raw water pipeline cement mortar lining corrosion iron release electrochemistry

为解决我国淡水时空分布不均及水源污染导致的供水紧缺问题,跨流域、跨地区的长距离输水方式成为一种可行方案^[1]。然而,长距离输水可能导致管道腐蚀,因此必须采取措施抑制腐蚀,从而防止“红水”、漏损等现象的发生^[2]。水泥砂浆内衬^[3]作为应用广泛的内衬涂料可有效阻止管壁腐蚀。然而,长距离调水跨越不同水系和地区,原水水质差异显著,同时受季节性调度和环境条件变化影响,水质参数波动频繁,易引起水质突变^[4-5]。

以南水北调、横山水库和白溪水库取水工程为例,上述工程均体现出跨流域、跨区域调配优质水资源的特征。南水北调工程跨越长江、淮河、黄河和海河四大水系,连接京津冀豫鲁皖苏等省市,实现了南北水资源的空间调配;横山水库取水工程途经西渚、张渚、鲸塘等乡镇,跨越多条河流至沭滨水厂,全长约 30.8 km;白溪水库作为宁波市最大的取水工程,途经宁海、奉化、鄞州和北仑,将原水输送至东钱湖、北仑和江东等水厂。总体来看,水源区水资源充足、水质优良,而受水区水资源相对匮乏、水质较差。例如,南水北调中线工程以丹江口水库为水源,其水质长期保持在地表水 II 类甚至 I 类标准^[6],而北方受水区多依赖地下水,普遍存在硬度和矿化度较高的问题,水质差异明显。研究^[7-8]表明:原水输送过程中水质受季节、降雨量和气候条件等因素影响,通常表现为非汛期水质优于汛期,输水量与水质也随之产生波动。

原水水质发生变化时,会打破原有水体与管壁之间的化学平衡,使腐蚀垢层的结构和组成发生调整甚至破坏,进而影响输水管道的腐蚀速率及铁释放情况,对管网的运行安全与长期稳定性构成潜在

威胁^[9]。因此,原水输送管道水泥砂浆内衬腐蚀及铁释放的影响因素研究对于控制管道腐蚀、延长管道使用寿命和保障原水水质安全具有重要意义。其中,氯离子(Cl^-)、硫酸根离子(SO_4^{2-})、碱度和硬度在水质波动中变化显著且直接影响腐蚀反应进程,被认为是影响水泥砂浆内衬腐蚀与铁释放的关键因素。

由于 Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子半径较小,容易穿透破坏金属表面的钝化膜,与管垢发生化学反应,故水体中的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度较大时,会加快离子迁移速率,从而加速腐蚀进程^[10-12]。而碱度升高会提升水体的缓冲强度,强化管垢表面的腐蚀瘤,减缓管道腐蚀,抑制铁释放^[13]。Imran 等^[14]的研究结果表明:若想有效控制铁释放量,需将水体中的碱度增大,当水体中碱度大于 80 mg/L 时,铁释放速率会明显减小,铁释放现象得到有效控制。另外,当水体中的碳酸钙质量浓度大于 25 mg/L 时,对管道腐蚀以及铁释放有很好的抑制作用^[15]。

简而言之,当前对于内腐蚀的研究主要集中在以下 3 个方面:对于腐蚀垢层的组成和结构的静态分析研究^[16];对于垢层组成和结构变化的影响因素研究^[17];腐蚀垢层的溶解或脱落对于水质的影响,即铁释放的研究^[18-19]。然而,以上研究主要针对供水管道,关于原水输送管道内腐蚀研究尚在起步阶段。故本研究以运输过不同原水水质的管道为研究对象,并基于改进式生物膜反应器模拟原水输送管道,通过铁释放量探究 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、碱度和硬度 4 种影响因素在不同浓度条件下对水泥砂浆内衬腐蚀速率的影响。另外,通过电化学工作站完成极化曲线测量和电化学阻抗谱测试,以此分别反映 4 种影响因

素在不同浓度条件下对水泥砂浆内衬腐蚀垢层、腐蚀反应进程的影响。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料和装置

本试验采用改进式生物膜环形反应器模拟原水输送管道^[20],共设置3组反应器,分别用G1、G2、G3表示。不同的反应器内设置不同水质条件培养后的反应试片,其中:G1为地表水试片;G2为地下水试片;G3为混合水试片。在3组反应器中分阶段通入4种影响因素在3种不同浓度条件下的原水,浓度梯度如表1所示。每组反应器连续运行48 h,每隔4 h进行取样并检测总铁浓度,48 h后对试片进行电化学测试。其中反应测试开始前需对配制好的溶液进行浓度梯度测试,反应结束之后,进行运行过程后的总铁浓度测试。

球墨铸铁试片长、宽分别为10、2 cm。电化学测试试片长、宽分别为2、1 cm,电极与试片的型号一致。试片经400#、800#、1200#的砂纸逐级打磨后

表1 单因素试验浓度设计

Tab. 1 Design of Concentrations for Single-Factor Experiments

影响因素	质量浓度梯度/(mg·L ⁻¹)	调控试剂
Cl ⁻	3.6, 54.0, 120.0	氯化钠
SO ₄ ²⁻	20, 229, 519	硫酸钠
碱度	100, 200, 300	碳酸氢钠
硬度	100, 200, 300	硝酸钙

浸泡在丙酮中以去除油污,然后用无水乙醇冲洗,晾干后置于干燥器中备用。水泥砂浆配方参照国家标准《球墨铸铁管和管件 水泥砂浆内衬》(GB/T 17457—2019),选用P II 42.5级普通硅酸盐水泥,利用水泥搅拌机将水泥、标准砂和水按照比例均匀混合,通过手工涂覆的方式将配制好的水泥砂浆分2遍均匀涂抹于试片正反两面,并在25℃的环境中养护28 d。试片制作完成后,分别放入运行地表水、地下水和混合水的反应器中运行共计12个月,模拟输送不同水质的老旧管道,反应器示意图及管道挂片材料如图1所示。

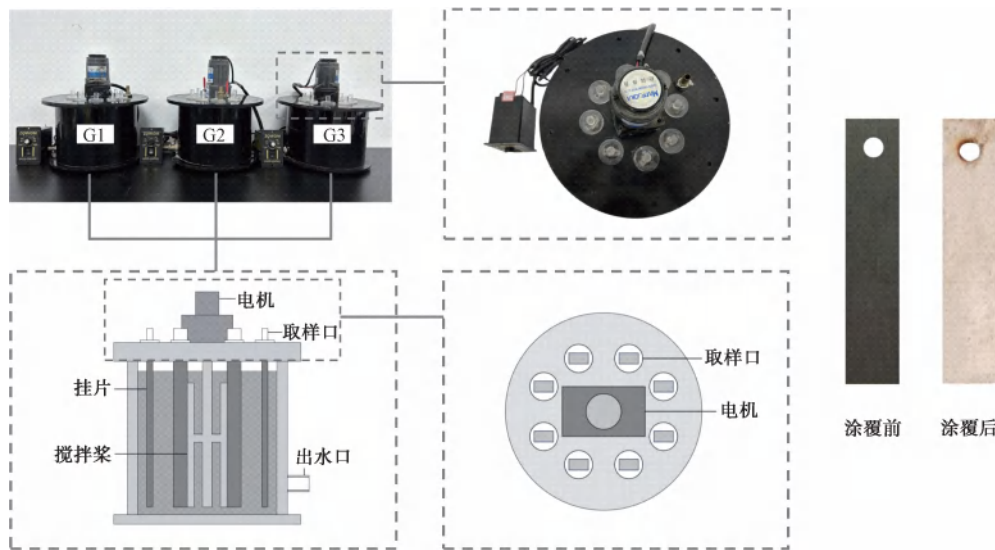


图1 改进式生物膜环形反应器示意图及管道试片材料

Fig. 1 Schematic Diagram of Improved Biofilm Annular Reactor and Pipe Coupon Materials

1.2 原水水质

本试验原水采用自配原水,共分为3组,其中水源A模拟地表水源水,水源B模拟地下水源水,水源C模拟混合水,根据不同比例进行调配。具体水质指标如表2所示。

1.3 检测项目和分析方法

本次研究采用总铁浓度和电化学测试相结合的方法,分别采用离子色谱法、酸碱滴定法、乙二胺四

乙酸(EDTA)络合滴定法和电感耦合等离子体发射光谱法测定氯化物、硫酸盐、碱度、硬度和总铁浓度。电化学工作站采用传统三电极体系,以饱和氯化银电极作为参比电极,铂电极作为辅助电极,测试试片作为工作电极。其中,检测内容包括开路电位、极化曲线^[21]和电化学阻抗谱测试^[22]。在极化曲线和电化学阻抗谱测试之前,对开路电位进行系统稳定性测试。极化曲线测试中,初始电位为-0.1 V,终止

表2 原水水质参数
Tab. 2 Raw Water Quality Parameters

水质指标	水源 A	水源 B	水源 C
温度/°C	25±1	25±1	25±1
碱度/(mg·L ⁻¹)	95.5±5.0	160.0±20.0	120.0±10.0
硬度/(mg·L ⁻¹)	130±5	180±20	150±10
SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	150±5	45±5	105±5
Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	110±5	20±5	70±5
pH 值	7.2±0.1	7.4±0.2	7.3±0.2
总溶解固体/(mg·L ⁻¹)	430±10	330±20	390±10
电导率/(μS·cm ⁻¹)	860±20	650±20	780±20
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	7.45±0.20	7.45±0.20	7.45±0.20
浊度/NTU	0.4±0.1	0.4±0.1	0.4±0.1
总铁/(mg·L ⁻¹)	0.06±0.05	0.06±0.05	0.06±0.05

电位为 0.1 V, 均相对于开路电压, 扫描速度为 0.5 mV/s。电化学阻抗谱测试中, 初始频率为 100 000 Hz, 终止频率为 0.01 Hz, 交变幅值为 10 mV。最后, 用 Zview 软件对测试数据进行分析并

根据相应的等效电路模型进行拟合。

2 结果与讨论

2.1 Cl⁻浓度对管道腐蚀的单因素影响分析

2.1.1 Cl⁻电化学腐蚀行为

G1、G2、G3 管道中不同 Cl⁻ 浓度下对应的极化曲线及腐蚀速率变化趋势如图 2 所示。

由图 2 可知, 对于输送地表水和地下水的管道, 随着 Cl⁻ 浓度增大, 极化曲线不断负移, 这是由于 Cl⁻ 浓度增大加剧了水体的导电性, Cl⁻ 为活性阴离子, 其存在会加速金属的阳极溶解, 因此 Cl⁻ 浓度越高, 试片的腐蚀倾向越高, 极化曲线负移。而由图 2 (c) 可知, Cl⁻ 质量浓度从 54.0 mg/L 升高到 120.0 mg/L 时极化曲线正移。其可能原因为 Cl⁻ 浓度增加, 使得氧在溶液中的溶解度降低, 导致腐蚀倾向减弱^[23]。由图 2 (d) 可知, 3 组管道在 Cl⁻ 浓度较低时, 腐蚀速率较小。随 Cl⁻ 浓度增大, G1、G2 管道腐蚀速率和腐蚀电流密度逐渐增大, G3 管道腐蚀速率和腐蚀电流密度则出现先增大后减小的趋势。

为探究阴阳极去极化在 Cl⁻ 腐蚀过程中的影

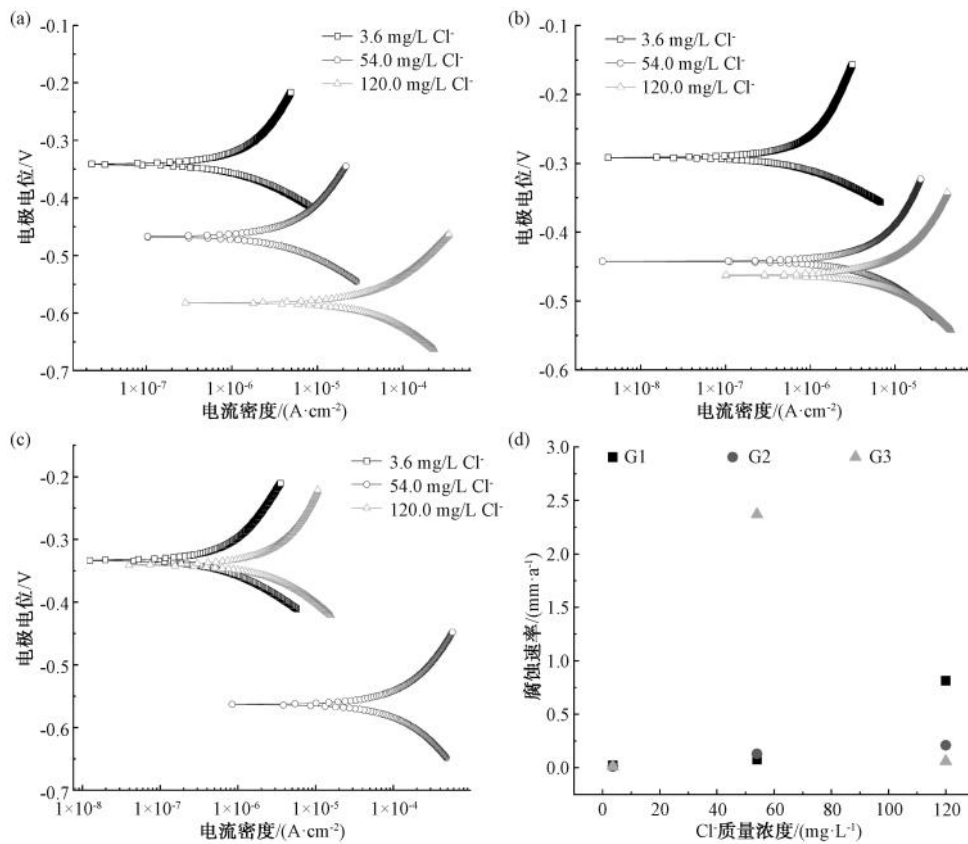


图2 (a) G1; (b) G2; (c) G3 管道不同 Cl⁻ 浓度下塔菲尔曲线图及 (d) 腐蚀速率变化趋势

Fig. 2 Tafel Curves under Different Cl⁻ Concentrations for Pipelines (a) G1; (b) G2; (c) G3 and (d) Trend of Corrosion Rates

响,对极化曲线进行拟合,结果如表 3 所示。由表 3 可知,G1、G2、G3 3 组管道在 Cl^- 浓度不同的情况下,阳极塔菲尔斜率(β_a)始终大于阴极塔菲尔斜率(β_c),说明 Cl^- 腐蚀主要体现在阴极去极化过程,在 Cl^- 作用下,阴极过程对于金属腐蚀起着决定性作

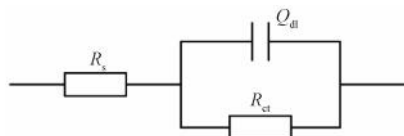
用。其中,G1 管道中,随着 Cl^- 浓度增加, β_a 和 β_c 均呈下降趋势,G2、G3 管道中, β_a 和 β_c 均呈现出先上升后下降的趋势。从腐蚀电流密度(I_{corr})可以看出,对于 G1 和 G2 管道, I_{corr} 逐渐增大,对于 G3 管道, I_{corr} 呈现先增大后减小的趋势。

表 3 G1、G2、G3 管道不同 Cl^- 浓度下 β_a 、 β_c 以及 I_{corr} 拟合结果

Tab. 3 Fitting Results of β_a , β_c and I_{corr} for Pipelines G1, G2, G3 at Different Cl^- Concentrations

Cl^- / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	β_a / mV			β_c / mV			$I_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
3.6	308.5	307.7	247.3	108.1	79.9	99.0	1.97×10^{-6}	1.14×10^{-6}	1.02×10^{-6}
54.0	216.8	414.5	274.8	107.2	165.4	220.2	6.47×10^{-6}	1.15×10^{-5}	2.47×10^{-4}
120.0	169.1	307.7	327.9	103.8	163.2	138.9	7.01×10^{-5}	1.81×10^{-5}	4.85×10^{-6}

图 3 为腐蚀挂片在 3 种不同浓度的 Cl^- 溶液中腐蚀的等效模型。G1、G2、G3 3 组管道中, Cl^- 在不同浓度下的电化学阻抗谱图谱如图 4 所示,具体拟合结果如表 4 所示。



注: R_s —溶液电阻; Q_{dl} —双电层电容; R_{ct} —电荷转移电阻。

图 3 拟合等效电路

Fig. 3 Fitted Equivalent Circuit

图 4 中电化学阻抗谱共有二个容抗弧,这是由于 Cl^- 浓度增加导致溶液电导率增大所致。因为高频部分的容抗弧只有在低电导率溶液中才会出现,而一旦溶液电导率增大到一定程度,高频部分的容抗弧便消失不见,由高频部分的容抗弧拟合出来的电阻的倒数与溶液电导率呈线性关系^[24]。另外,低频容抗弧与 Q_{dl} 及 R_{ct} 有关。由图 4 可知,低频容抗弧在 Cl^- 质量浓度最低,即为 3.6 mg/L 时,对应的容抗弧最大,说明此时抗腐蚀性能最强。G1、G2 管道中,随着 Cl^- 浓度增大,腐蚀垢层被破坏,试片基体暴露而加速腐蚀,容抗弧逐渐减小。G3 管道中,容抗弧呈现先减小后增大的趋势,说明前期垢层耐蚀性随着 Cl^- 浓度增大而减小,但是当 Cl^- 浓度增大到一定值时,由于溶解氧含量变小, Cl^- 在 G3 管道试片表面吸附位点减少,使得腐蚀反应减弱。

对于 G1、G2、G3 3 组管道, R_s 随着 Cl^- 浓度增加

而减小,这是因为 Cl^- 提高了溶液导电性,且 Cl^- 浓度越高,导电性越强。由表 4 可知,不同 Cl^- 浓度下的管道对应的电极表面状态不同。G1 管道中,弥散系数(n)在不同 Cl^- 浓度下的值为 0~0.5^[25],说明电极表面呈多孔状态;而 G2、G3 管道对应的 n 值为 0.5~1.0,说明电极表面粗糙。另外,G1、G2 管道中 R_{ct} 值随着 Cl^- 浓度增大而减小,说明 Cl^- 影响反应过程中的电荷转移过程, Cl^- 浓度越大,电荷电极与电解质溶液两相界面转移过程越容易;而 G3 管道中, R_{ct} 值随着 Cl^- 浓度先减小后增大。因此,增加 Cl^- 浓度会破坏腐蚀垢层,减弱抗腐蚀性能。但当其浓度增大到一定值时,对于某些环境下的垢层,会减弱腐蚀倾向,同时垢层的耐腐蚀性增强。

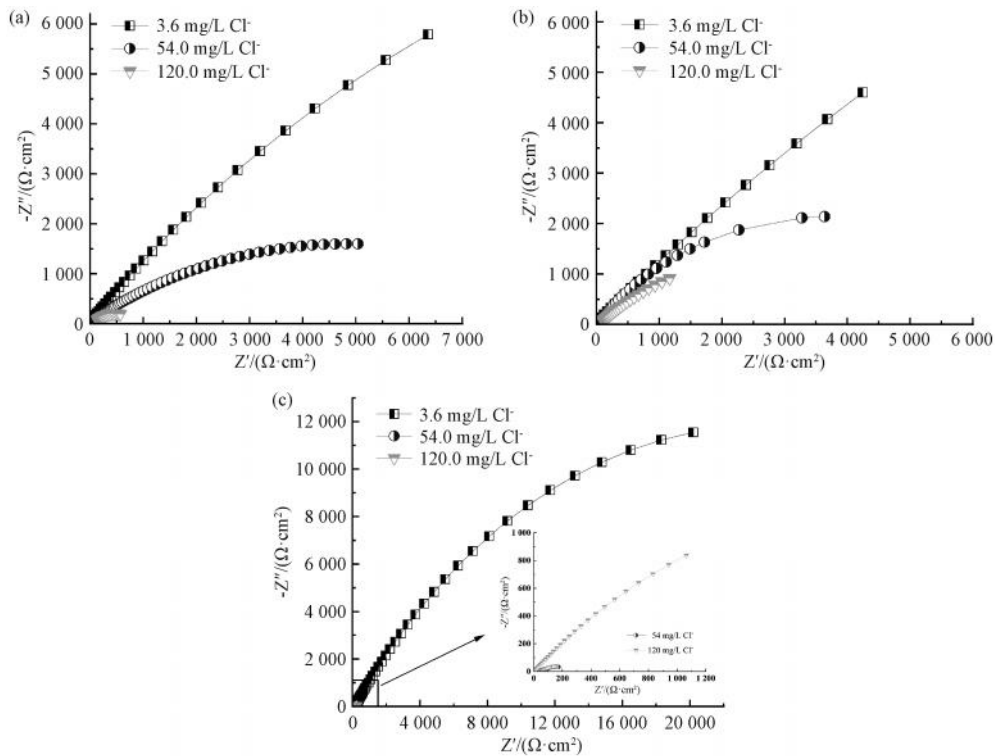
2.1.2 不同 Cl^- 浓度下铁释放量变化规律

由图 5 可知,在不同 Cl^- 浓度下,输送不同水质的管道总铁释放速率不同。相较于 G1、G3 管道,G2 管道中铁释放变化较为平缓,说明 Cl^- 对于输送地下水管道的垢层腐蚀作用较小,而地表水和混合水垢层受 Cl^- 腐蚀作用影响较大。根据 3 组管道在不同 Cl^- 浓度下的总铁平均释放量可知,随着 Cl^- 浓度增大,总铁平均释放质量浓度由 2.37 mg/L 增长至 3.08 mg/L,最后达到 4.27 mg/L。由此可见,铁释放速率随 Cl^- 浓度升高而增大,原因在于其可增强水体导电性并能穿透钝化膜,导致管道腐蚀。

2.2 SO_4^{2-} 浓度对管道腐蚀的单因素影响分析

2.2.1 SO_4^{2-} 电化学腐蚀行为

由图 6 可知,对于运输地表水和地下水的 G1



注: Z' —阻抗实部, $\Omega \cdot \text{cm}^2$; $-Z''$ —阻抗虚部负值, $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

图 4 (a) G1; (b) G2; (c) G3 管道不同 Cl^- 浓度下奈奎斯特图

Fig. 4 Nyquist Plots for Pipelines (a) G1; (b) G2; (c) G3 at Different Cl^- Concentrations

表 4 G1、G2、G3 管道不同 Cl^- 浓度下交流阻抗拟合结果

Tab. 4 Alternating Current Impedance Fitting Results for Pipelines G1, G2, G3 at Different Cl^- Concentrations

$\text{Cl}^- /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$			$Q_{dl} / (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$			n			$R_{ct} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
3.6	152	151	130	3.3×10^{-4}	5.4×10^{-4}	2.6×10^{-4}	0.5	0.6	0.6	3.8×10^4	6.5×10^4	4.9×10^4
54.0	112	53	41	7.1×10^{-4}	2.1×10^{-3}	1.2×10^{-2}	0.4	0.7	0.6	9.4×10^3	7.4×10^3	5.8×10^2
120.0	47	48	16	8.6×10^{-3}	2.7×10^{-3}	2.1×10^{-1}	0.5	0.6	0.6	6.6×10^2	5.9×10^3	8.6×10^3

和 G2 管道,随着 SO_4^{2-} 浓度增大,极化曲线负移,其作用机理同 Cl^- 相似;而在运输混合水的老旧管道 G3 中, SO_4^{2-} 浓度达到一定值时,极化曲线正移,如图 6(c)所示。这可能是由于 SO_4^{2-} 浓度增大到一定程度时,腐蚀垢层的活性位点一部分被 SO_4^{2-} 的吸附所覆盖,使得 SO_4^{2-} 的吸附变得更加困难,点蚀更难发生,因此腐蚀倾向更弱^[11,26]。由图 6(d)可知,运输不同水质的老旧管道在 SO_4^{2-} 浓度较低时,腐蚀速率和 I_{corr} 较小,随着 SO_4^{2-} 浓度增大,G1、G2 管道的腐蚀速率和 I_{corr} 逐渐增大,G3 管道的腐蚀速率和 I_{corr} 则出现先增大后减小的趋势。

由表 5 可知,G1、G2、G3 3 组管道在 SO_4^{2-} 浓度不同的情况下, β_a 始终大于 β_c ,说明 SO_4^{2-} 腐蚀也主要体现在阴极去极化过程,作用机理同 Cl^- 相似。随着 SO_4^{2-} 浓度增大,3 组管道的 β_a 逐渐降低,而 β_c 基本保持不变,说明 SO_4^{2-} 浓度变化对于阳极反应的影响大于对阴极反应的影响。由图 6(d)和 I_{corr} 可知,3 组管道在 SO_4^{2-} 浓度较低时,腐蚀速率和 I_{corr} 较小,随着 SO_4^{2-} 浓度增大,G1、G2 管道的腐蚀速率和 I_{corr} 逐渐增大,G3 管道的腐蚀速率和 I_{corr} 则出现先增大后减小的趋势,该趋势与 Cl^- 浓度变化对应的规律相似。

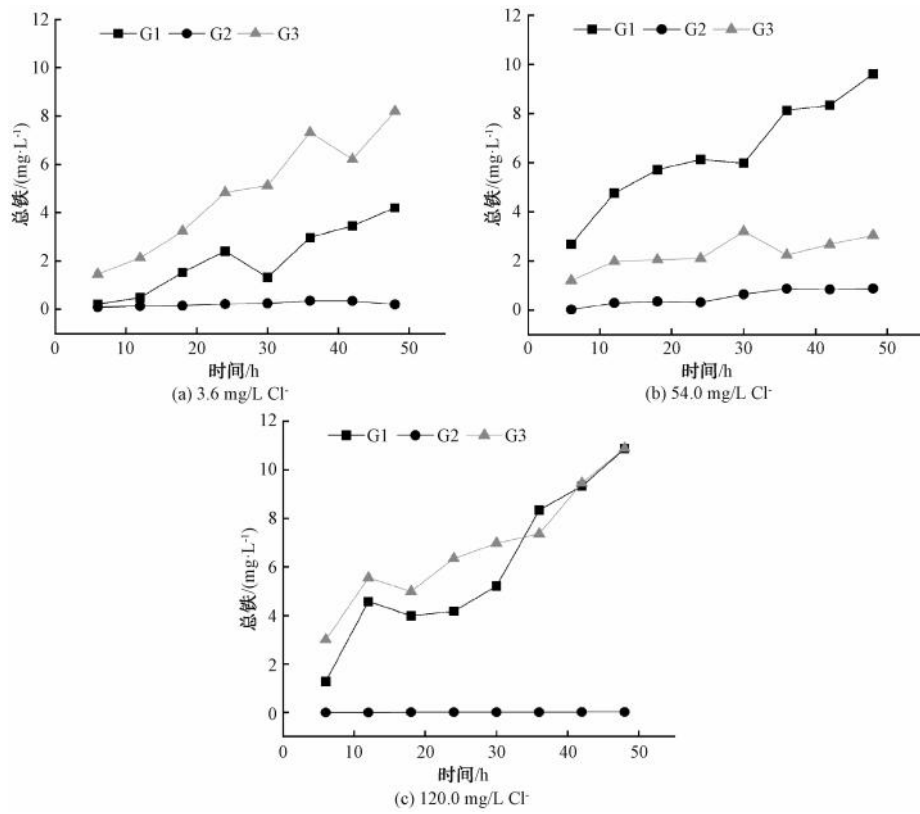


图5 不同 Cl^- 浓度下铁释放在 48 h 内变化趋势

Fig. 5 Trend of Iron Release over 48 h under Different Cl^- Concentrations

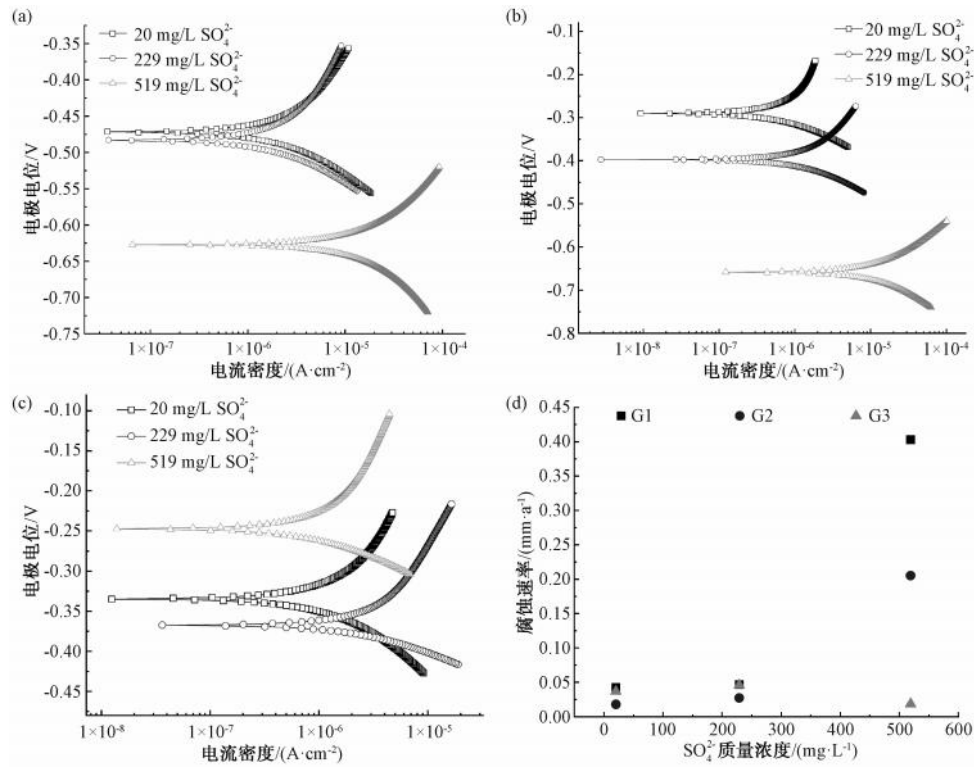


图6 (a) G1; (b) G2; (c) G3 管道不同 SO_4^{2-} 浓度下塔菲尔曲线图及 (d) 腐蚀速率变化趋势

Fig. 6 Tafel Curves under Different SO_4^{2-} Concentrations for Pipelines (a) G1; (b) G2; (c) G3 and (d) Trend of Corrosion Rates

表 5 G1、G2、G3 管道不同 SO_4^{2-} 浓度下 β_a 、 β_c 以及 I_{corr} 拟合结果

Tab. 5 Fitting Results of β_a , β_c , and I_{corr} for Pipelines G1, G2, G3 at Different SO_4^{2-} Concentrations

$\text{SO}_4^{2-}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	β_a/mV			β_c/mV			$I_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
20	0.36	1.01	0.45	0.12	0.13	0.17	4.03×10^{-6}	1.53×10^{-6}	3.16×10^{-6}
229	0.32	0.27	0.34	0.11	0.13	0.07	3.63×10^{-6}	1.26×10^{-5}	3.95×10^{-6}
519	0.22	0.15	0.32	0.14	0.14	0.08	3.47×10^{-5}	1.77×10^{-5}	1.60×10^{-6}

如图 7 所示,与不同 Cl^- 浓度下的奈奎斯特图特征一致,不同 SO_4^{2-} 浓度下的电化学阻抗谱共有一个容抗弧,容抗弧半径与 R_{ct} 有关,且阻抗谱弧度大小随 SO_4^{2-} 浓度变化而变化,容抗弧半径反应试片的抗腐蚀性能。当 SO_4^{2-} 质量浓度最小,即为 20 mg/L 时,对应的容抗弧半径最大,此时抗腐蚀能力最强,

随着 SO_4^{2-} 浓度增大,容抗弧半径不断缩小,抗腐蚀性能逐渐降低。当 G3 管道中 SO_4^{2-} 质量浓度增大到 519 mg/L 时,容抗弧呈现增大趋势,这可能是由于高浓度的 SO_4^{2-} 在腐蚀垢层表面覆盖,增强了抗腐蚀性能。

由表 6 可知, SO_4^{2-} 浓度的增加提高了溶液的导

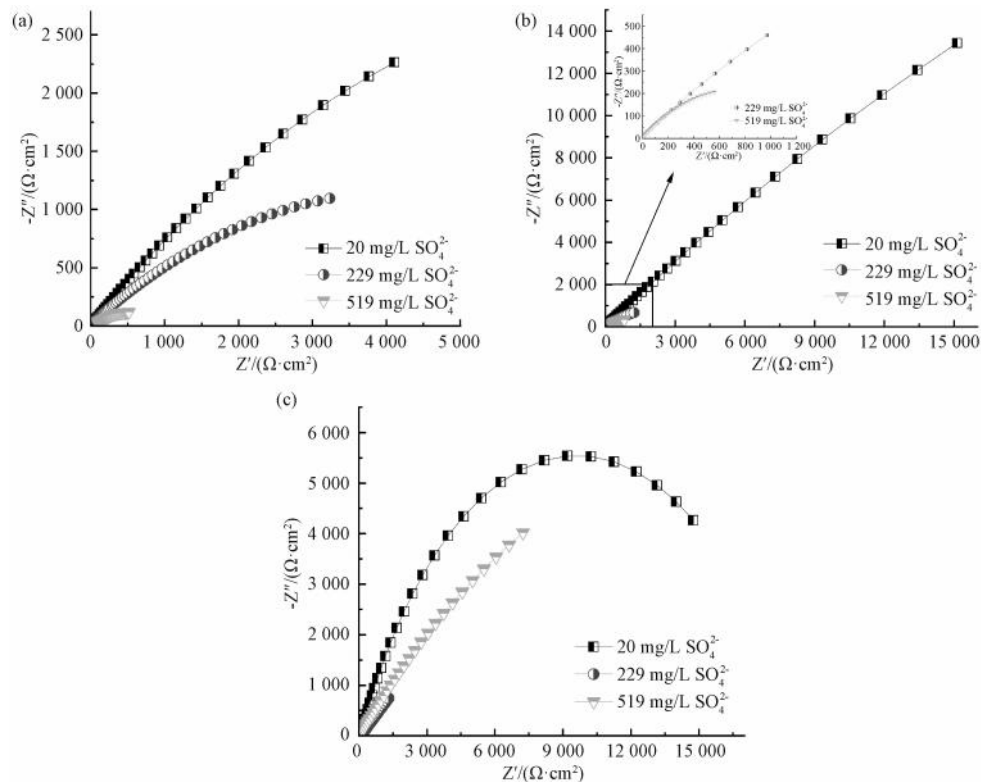


图 7 (a)G1; (b)G2; (c)G3 管道不同 SO_4^{2-} 浓度下奈奎斯特图

Fig. 7 Nyquist Plots for Pipelines (a) G1; (b) G2; (c) G3 at Different SO_4^{2-} Concentrations

电性,此时 R_s 值减小,溶液导电性增强,腐蚀程度增大。同时 n 值减小,说明垢层的致密性受到了破坏,由表面粗糙状态向多孔状态转变。在多孔状态下,腐蚀性阴离子更容易穿透垢层表面^[27],从而对铁基造成破坏,铁释放现象越显著,因此 SO_4^{2-} 在多孔状态下对于材料的腐蚀作用更强。对于 G1、G2 管道

来说, R_{ct} 值随着 SO_4^{2-} 浓度的增加而减小,说明 SO_4^{2-} 影响反应过程中的电荷转移过程, SO_4^{2-} 浓度越大,电荷电极和电解质溶液两相界面的转移过程越容易进行,管道腐蚀程度加剧,铁释放速率更快^[28]。对于 G3 管道来说,当 SO_4^{2-} 浓度增大到一定值时, R_{ct} 呈现增大趋势,原因在前文中已解释。

表6 G1、G2、G3 管道不同 SO_4^{2-} 浓度下交流阻抗拟合结果

Tab. 6 Alternating Current Impedance Fitting Results for Pipelines G1, G2, G3 at Different SO_4^{2-} Concentrations

$\text{SO}_4^{2-}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$			$Q_{dl}/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$			n			$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
20	123	145	103	3.9×10^{-4}	1.7×10^{-4}	1.4×10^{-4}	0.4	0.5	0.7	1.7×10^4	1.6×10^4	1.9×10^4
229	109	136	101	1.7×10^{-3}	2.3×10^{-4}	8.0×10^{-4}	0.3	0.3	0.3	1.1×10^3	6.3×10^3	8.3×10^3
519	97	129	97	3.6×10^{-4}	1.8×10^{-3}	2.7×10^{-4}	0.3	0.4	0.4	2.5×10^3	1.4×10^3	3.5×10^4

2.2.2 不同 SO_4^{2-} 浓度下铁释放量变化规律

G1、G2、G3 3 组管道中, SO_4^{2-} 浓度最低时铁释放速率最低, 随着 SO_4^{2-} 浓度增加, 铁释放速率逐渐增大。根据 3 组管道在不同 SO_4^{2-} 浓度下的总铁平均释放量可知, 随着 SO_4^{2-} 浓度的增大, 总铁平均释放质量浓度由 1.11 mg/L 增长至 46.00

mg/L, 最后达到 68.00 mg/L。由图 8 可知, G2 管道中铁离子释放速率相较于 G1 和 G3 管道更为缓慢, 说明 SO_4^{2-} 对于输送地下水的管道垢层腐蚀作用较小, 而地表水和混合水垢层受 SO_4^{2-} 腐蚀作用影响更大, 这可能与垢层的结构以及垢层的组分有关。

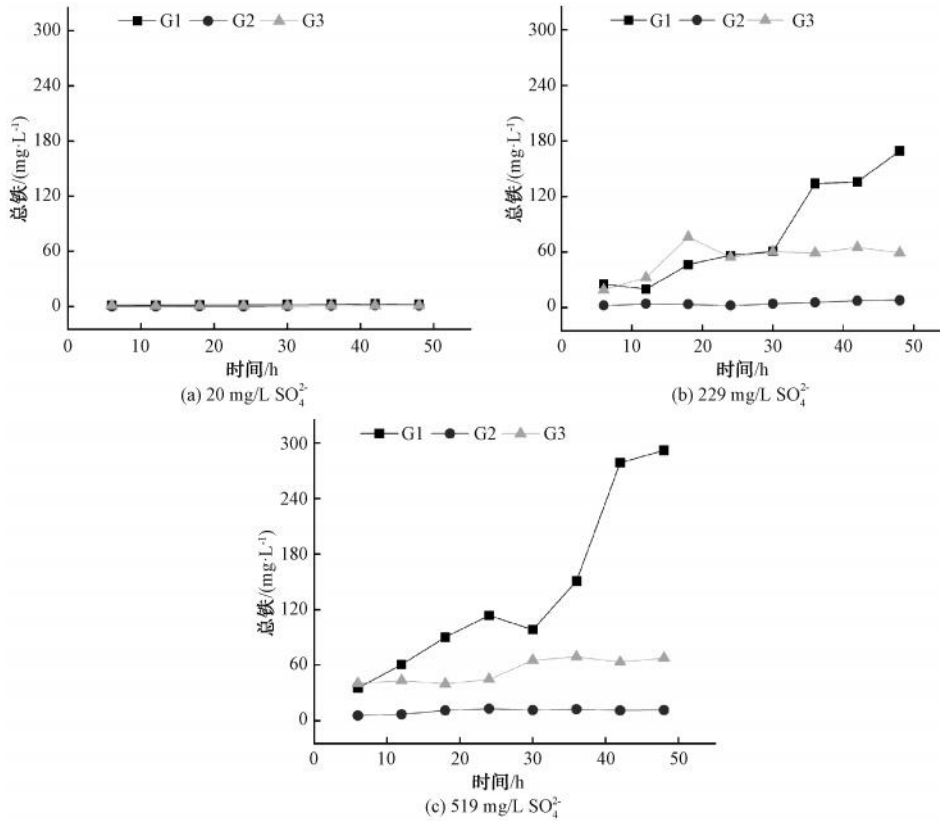


图8 不同 SO_4^{2-} 浓度下铁释放量在 48 h 内变化趋势

Fig. 8 Trend of Iron Release over 48 h under Different SO_4^{2-} Concentrations

2.3 碱度对管道腐蚀的单因素影响分析

2.3.1 碱度电化学腐蚀行为

由图 9 可知, 3 组管道的极化曲线随着碱度增大不断正移, 最终稳定在 $-0.3 \sim -0.2 \text{ V}$, 同时腐蚀速率随着碱度的增大而减小。说明碱度为 100 mg/L

时, 腐蚀倾向较强, 碱度为 300 mg/L 时, 极化曲线正移, 腐蚀速率趋于稳定。这可能是因为水体中的碳酸氢盐碱度会与二价铁离子 (Fe^{2+}) 反应生成铁氧化物, 在管道表面吸附和沉积, 使得腐蚀减缓, 趋势倾向减弱^[29-30]。

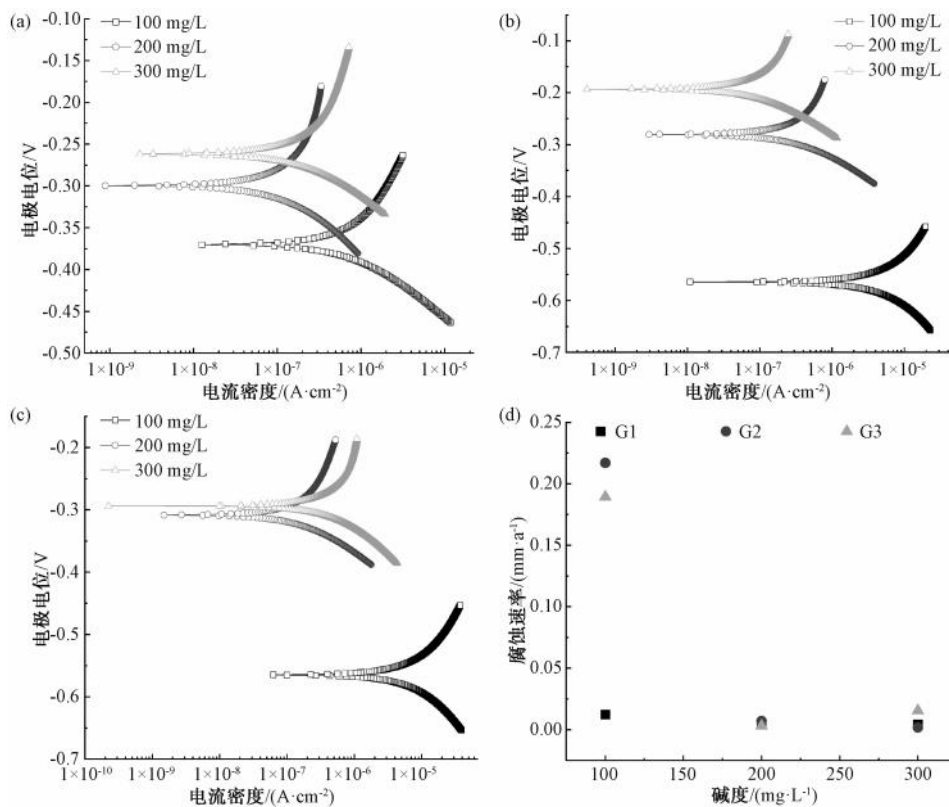


图9 (a) G1; (b) G2; (c) G3 管道不同碱度下塔菲尔曲线图及 (d) 腐蚀速率变化趋势

Fig. 9 Tafel Curves under Different Alkalinity for Pipelines (a) G1; (b) G2; (c) G3 and (d) Trend of Corrosion Rates

表7中展示了不同碱度条件下 β_a 、 β_c 和 I_{corr} 的拟合结果。由表7可知,在不同碱度条件下G1、G2和G3 3组管道, β_a 始终大于 β_c ,说明碱度对于腐蚀的作用主要体现在阴极去极化过程中,其作用机理同 Cl^- 和 SO_4^{2-} 相似。与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 对管道腐蚀作用不同的是,随着碱度不断增大,3组管道的

β_a 均缓慢上升,说明总碱度对阳极反应具有一定抑制作用;同时 β_c 呈轻微下降的趋势,说明总碱度对阴极反应具有一定促进作用,且其中抑制作用大于促进作用,从而使得高碱度对管道具有一定保护作用。另外, I_{corr} 保持在较低水平,随着碱度增大不断减小。

表7 G1、G2、G3 管道不同碱度下 β_a 、 β_c 以及 I_{corr} 拟合结果
Tab. 7 Fitting Results of β_a , β_c , I_{corr} for Pipelines G1, G2, G3 at Different Alkalinity

碱度/ (mg·L ⁻¹)	β_a /mV			β_c /mV			$I_{corr}/(A·cm^{-2})$		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
100	0.22	0.59	0.27	0.09	0.33	0.20	1.06×10^{-6}	1.87×10^{-5}	1.63×10^{-5}
200	0.32	0.69	0.43	0.15	0.11	0.09	3.60×10^{-7}	6.02×10^{-7}	2.73×10^{-7}
300	0.42	0.69	0.53	0.10	0.10	0.15	3.74×10^{-7}	1.56×10^{-7}	1.33×10^{-6}

由图10可知,不同碱度条件下的电化学阻抗谱共有一个容抗弧,且阻抗谱的弧度大小随碱度变化而变化。碱度较大时,对应的容抗弧半径较大,此时抗腐蚀能力最强;碱度减小时,容抗弧半径不断缩小,抗腐蚀性能逐渐降低。

由表8中拟合结果可知,碱度变化使得 R_s 大小

受到影响, Q_{dl} 维持在较小浓度且变化不明显。同 Cl^- 和 SO_4^{2-} 相比,3组管道在调节碱度之后, n 值较大,说明碱度可以增大垢层致密性,由表面多孔状态向表面粗糙状态转变。3组管道的 R_{ct} 随着碱度浓度增加而增大,说明增加碱度,可以加剧极化作用阻碍电子传递,抑制腐蚀^[31]。

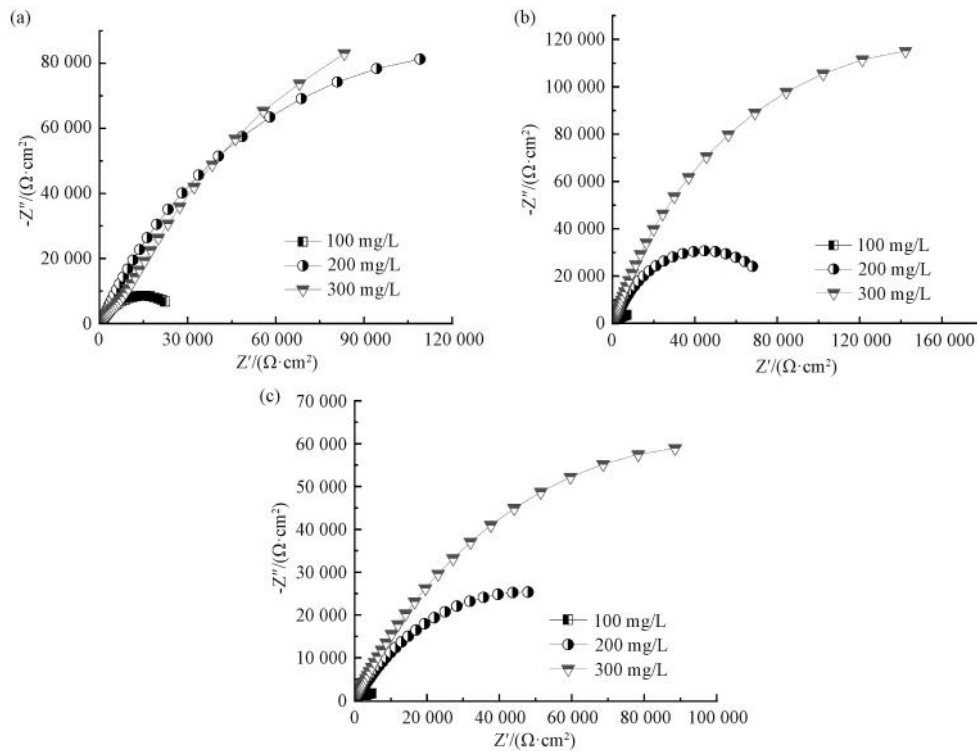


图 10 (a) G1; (b) G2; (c) G3 管道不同碱度下奈奎斯特图

Fig. 10 Nyquist Plots for Pipelines (a) G1; (b) G2; (c) G3 at Different Alkalinity

表 8 G1、G2、G3 管道不同碱度下交流阻抗拟合结果

Tab. 8 Alternating Current Impedance Fitting Results for Pipelines G1, G2, G3 at Different Alkalinity

碱度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$			$Q_{dl} / (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$			n			$R_{ct} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
100	411	1 092	120	1.3×10^{-4}	6.7×10^{-5}	4.0×10^{-4}	0.7	0.8	0.6	2.9×10^4	8.5×10^4	2.8×10^3
200	465	999	1 183	6.0×10^{-5}	6.7×10^{-5}	7.4×10^{-5}	0.7	0.7	0.7	2.6×10^5	8.8×10^4	2.0×10^4
300	319	1 398	537	1.1×10^{-4}	5.7×10^{-5}	8.9×10^{-5}	0.6	0.8	0.6	9.8×10^4	3.2×10^5	9.2×10^4

2.3.2 不同碱度下铁释放量变化规律

由图 11 可知,铁释放速率随原水中碱度增大而减小。在碱度为 100 mg/L 和 200 mg/L 时,G1、G3 管道总铁释放曲线变化较大,G2 管道变化平缓。在碱度达到 300 mg/L 时,3 组管道的铁释放速率曲线均较平缓。根据 3 组管道在不同碱度下的总铁平均释放量可知,随着碱度增大,总铁平均释放质量浓度由 34 mg/L 减小至 25 mg/L,最后降至 14 mg/L。当水体中存在碳酸氢盐碱度时,会与水中的 Fe^{2+} 或 Ca^{2+} 发生反应,生成的产物覆盖在试片表面,使得管垢的抗腐蚀性能增强,阻止铁基物质的进一步腐蚀,同时生成的腐蚀瘤增强了水体的缓冲强度,减缓铁释放速率^[29]。

2.4 硬度对管道腐蚀的单因素影响分析

2.4.1 硬度电化学腐蚀行为

由图 12 可知,运输不同水质的 3 组管道的极化曲线随着硬度增大呈现先负移后正移的变化趋势,其中 G1 管道变化趋势较大,G2 和 G3 管道由于腐蚀产物特征原因,腐蚀电位随硬度变化不明显。由图 12(d) 可知,3 组管道腐蚀速率随着硬度增大而减小,在硬度为 300 mg/L 时,腐蚀速率达到最小值。

表 9 中,G1、G2、G3 3 组管道在不同硬度条件下, β_a 始终大于 β_c ,说明硬度对于腐蚀的作用主要也体现在阴极去极化过程中。其中, β_a 和 β_c 呈现先降后升的趋势,说明硬度同时影响阳极反应和阴极反应,随着硬度增大,可抑制其反应作用。

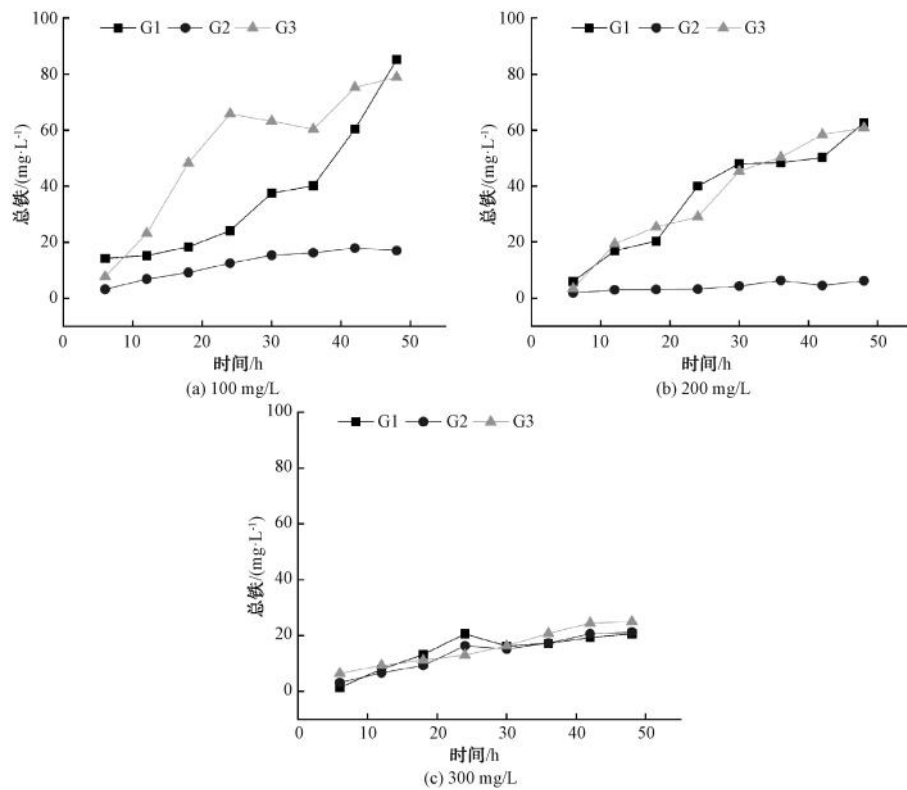


图 11 不同碱度下铁释放量在 48 h 内变化趋势

Fig. 11 Trend of Iron Release over 48 h under Different Alkalinity

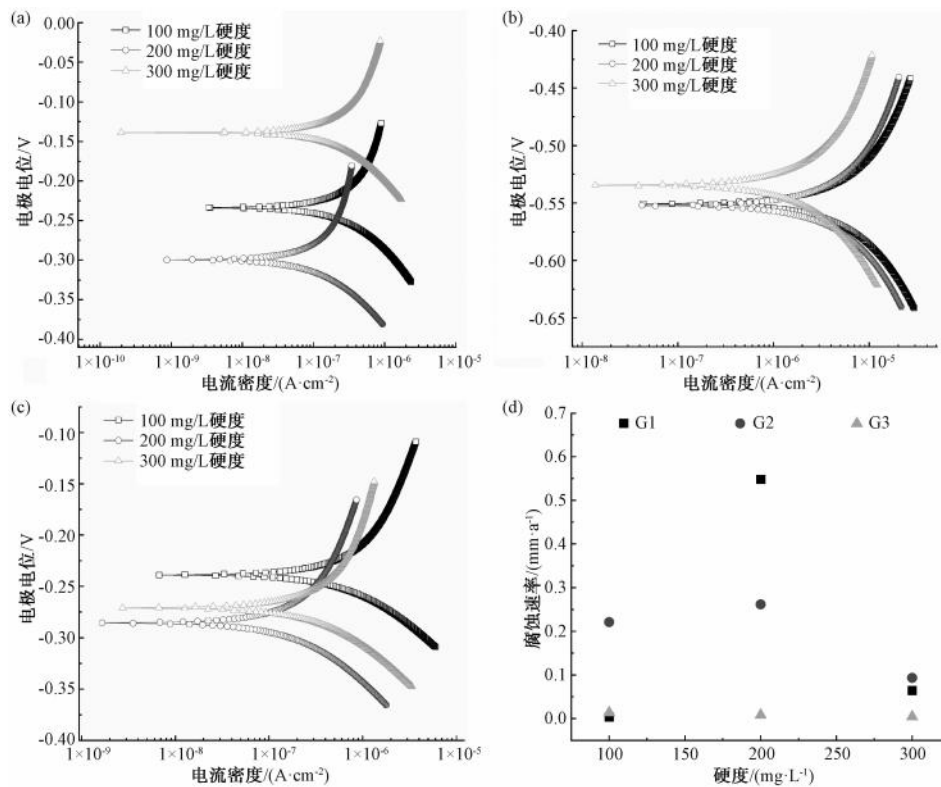


图 12 (a) G1; (b) G2; (c) G3 管道不同硬度下塔菲尔曲线图及 (d) 腐蚀速率变化趋势

Fig. 12 Tafel Curves under Different Hardness for Pipelines (a) G1; (b) G2; (c) G3; (d) Trend of Corrosion Rates

表 9 G1、G2、G3 管道不同硬度下 β_a 、 β_c 以及 I_{corr} 拟合结果
Tab. 9 Fitting Results of β_a , β_c , and I_{corr} for Pipelines G1, G2, and G3 at Different Hardness

硬度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	β_a/mV			β_c/mV			$I_{corr}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
100	0.28	0.43	0.24	0.14	0.27	0.09	3.15×10^{-7}	1.90×10^{-5}	1.18×10^{-6}
200	0.12	0.50	0.31	0.11	0.26	0.11	4.72×10^{-5}	8.00×10^{-6}	3.63×10^{-7}
300	0.41	0.75	0.42	0.18	0.37	0.10	5.52×10^{-6}	2.30×10^{-5}	6.93×10^{-7}

与不同硬度条件下奈奎斯特图特征一致,图 13 展示了不同硬度条件下的电化学阻抗谱,仍共有一个容抗弧。硬度较大时,对应的容抗弧半径较大,此

时抗腐蚀能力最强;硬度减小时,容抗弧半径不断缩小,抗腐蚀性能逐渐降低。

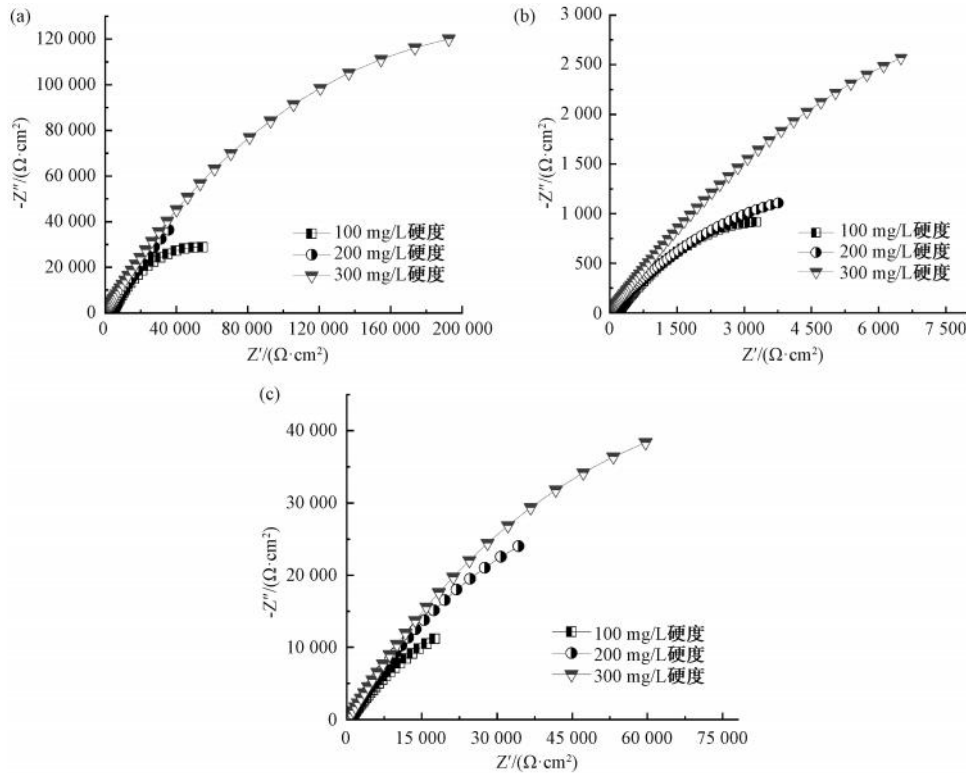


图 13 (a) G1; (b) G2; (c) G3 管道不同硬度下奈奎斯特图

Fig. 13 Nyquist Plots for Pipelines (a) G1; (b) G2; (c) G3 at Different Hardness

由表 10 拟合结果可知, R_s 先减小后增大,这是由于硬度的升高增加了溶液导电性,同上文塔菲尔曲线变化趋势一致。 Q_{dl} 维持在较小浓度且数值逐渐降低,说明硬度有利于垢层的稳定。同

硬度相比,3 组管道在调节硬度之后, n 值较小,表面垢层为多孔型结构。3 组管道的 R_{ct} 随着硬度增加而增大,可以加剧极化作用阻碍电子传递,抑制腐蚀。

表 10 G1、G2、G3 管道不同硬度下交流阻抗拟合结果
Tab. 10 Alternating Current Impedance Fitting Results for Pipelines G1, G2, G3 at Different Hardness

硬度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$			$Q_{dl}/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$			n			$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
100	210	142	810	7.4×10^{-5}	6.1×10^{-4}	3.4×10^{-4}	0.6	0.4	0.6	9.7×10^4	6.6×10^3	4.5×10^4
200	345	139	402	1.1×10^{-4}	4.8×10^{-4}	1.4×10^{-4}	0.4	0.3	0.5	3.6×10^5	1.0×10^4	1.3×10^5
300	705	320	1 474	4.7×10^{-5}	2.9×10^{-4}	9.1×10^{-5}	0.6	0.4	0.6	4.8×10^5	2.1×10^4	1.9×10^5

2.4.2 不同硬度下铁释放量变化规律

3组管道在不同硬度下的铁平均释放量呈现先增大后减小的趋势。由图14可知,G2管道曲线较G1和G3管道曲线变化更为剧烈,说明硬度变化对G2管道影响较大。这可能是由于G2管道在原有环境中产生的垢层对硬度变化的适应能力较弱,故

腐蚀过程总铁变化较明显^[32],该过程也可从2.4.1小节对电化学阻抗谱的拟合结果中得到证实。管道G2中拟合的 R_{ct} 值较小,垢层保护能力较弱,说明增加硬度有利于垢层稳定,但是由于硬度提高带来的离子浓度变化和离子活性变化,可能使得铁释放更大。

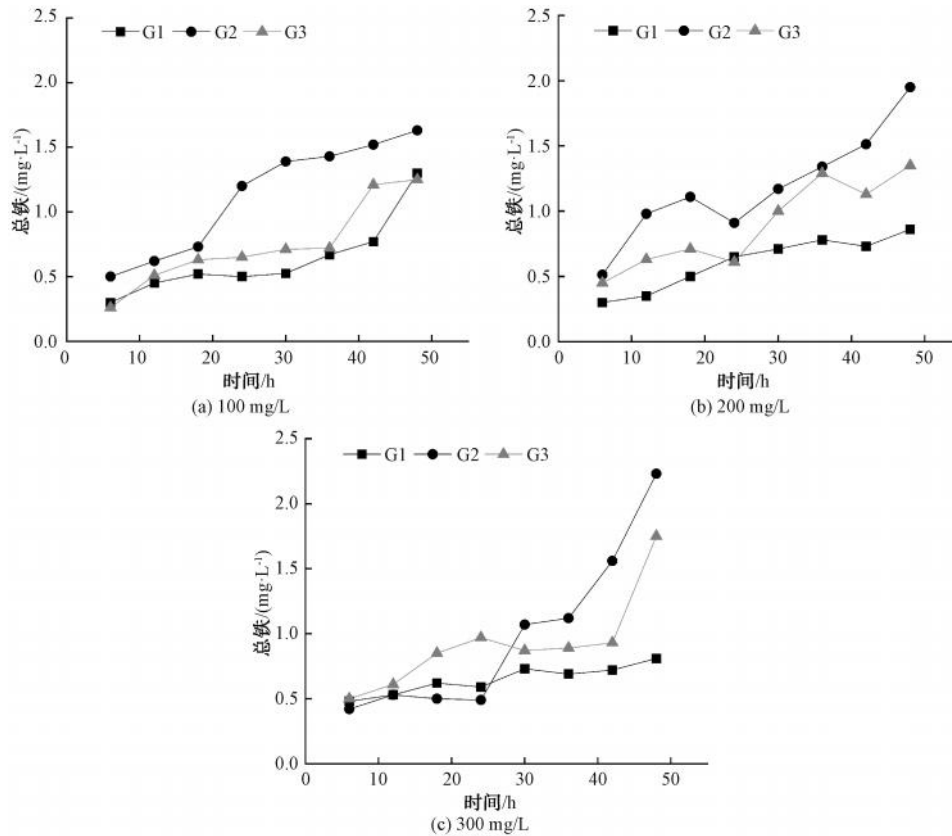


图14 不同硬度下铁释放量在48 h内变化趋势

Fig. 14 Trend of Iron Release over 48 h under Different Hardness

3 结论

(1) 输送不同水质原水的管道中, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、碱度和硬度4种影响因素对于腐蚀的作用均主要体现在阴极去极化过程中。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度增大增强腐蚀,碱度增加减弱腐蚀,而硬度增加则先抑制后促进腐蚀。

(2) Cl^- 可同时促进阴阳极反应,随着 Cl^- 浓度升高容抗弧逐渐减小,抗腐蚀性能减弱,但当其质量浓度增加至120 mg/L时会影响溶解氧对于腐蚀的促进作用,而使腐蚀倾向变弱。 SO_4^{2-} 浓度增大 n 值减小,垢层致密性被破坏,但当其质量浓度提升至519 mg/L时,垢层耐腐蚀性增强。

(3) 增大碱度可加剧极化作用阻碍电子传递,

从而抑制腐蚀,同时铁释放速率随之不断减小。硬度增加会形成碳酸根保护层,容抗弧半径随之增大,铁释放速率减缓。适当提高碱度和硬度可增强原水输送管道的防护效能。

参考文献

- [1] 雒江菡. 大型原水输水管道水质模拟及生物膜净水功能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Luo J H. Research on water characteristics simulation and function of biofilm purifying water in large-scale raw water distribution systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [2] Hu Y F, Li R T, Bian K Q, et al. Biofilm formation dynamics in long-distance water conveyance pipelines: Impacts of nutrient levels and metal stress [J]. Water Research, 2025, 268:

122672. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122672.
- [3] 谢震方, 李斐. 供水用球墨铸铁管质量评价指标体系[J]. 净水技术, 2024, 43(4): 202-208.
Xie Z F, Li F. Index system of quality assessment for water supply ductile iron pipes[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4): 202-208.
- [4] 张锋, 俞周, 芮继承, 等. 长距离输水管道输水过程中水质变化情况[J]. 中国给水排水, 2022, 38(15): 50-54.
Zhang F, Yu Z, Rui J C, et al. Changes of water quality in long-distance pipelines during transmission[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(15): 50-54.
- [5] 齐帅格. 长距离输水管道原水水质变化及影响因素试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022.
Qi S G. Experimental study on raw water quality change and its influencing factors of long-distance water distribution pipeline[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022.
- [6] 曾俊. 南水北调中线水源区水质时空分异规律及其藻类增殖风险预警研究[D]. 南宁: 广西大学, 2024.
Zeng J. Spatio-temporal variation of water quality and early warning of algae proliferation risk in the water source area of the middle route of the south-to-north water diversion project[D]. Nanning: Guangxi University, 2024.
- [7] Lu L J, Chen Y C, Li M J, et al. Spatiotemporal characteristics and potential pollution factors of water quality in the eastern route of the south-to-north water diversion project in china[J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: 131523. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131523.
- [8] 徐若诗, 逢勇, 罗缙, 等. 基于 WQI 的南水北调东线江苏段水质评价及时空分布特征[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5227-5234.
Xu R S, Pang Y, Luo J, et al. Water quality evaluation and spatial-temporal distribution characteristics of the east route of the south-to-north water diversion project in Jiangsu Province based on WQI[J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5227-5234.
- [9] Świetlik J, Raczyk-Stanislawiak U, Piszora P, et al. Corrosion in drinking water pipes: The importance of green rusts[J]. Water Research, 2012, 46(1): 1-10.
- [10] Zuo X B, Qiu L F, Tang Y X, et al. Corrosion process of steel bar in cement pastes under combined action of chloride and sulfate attacks[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3): 352-358, 372.
- [11] Chen Z, Wei Z S, Chen Y M, et al. Molecular insight into iron corrosion induced by chloride and sulphate[J]. Computational Materials Science, 2022, 209: 111429. DOI: 10.1016/j.commatsci.2022.111429.
- [12] Lytle D A, Tang M, Francis A T, et al. The effect of chloride, sulfate and dissolved inorganic carbon on iron release from cast iron[J]. Water Research, 2020, 183: 116037. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116037.
- [13] 许仕荣, 赵伟, 王长平, 等. 低硬、低碱度水的再矿化对管道腐蚀的控制效果[J]. 中国给水排水, 2012, 28(17): 1-4.
Xu S R, Zhao W, Wang C P, et al. Remineralization of low hardness and low alkalinity water for pipeline corrosion control[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(17): 1-4.
- [14] Imran S A, Dietz J D, Mutoti G, et al. Red water release in drinking water distribution systems[J]. Journal AWWA, 2005, 97(9): 93-100.
- [15] Ren L, Cheng Y H, Wang Q Q, et al. Simulation of the relationship between calcium carbonate fouling and corrosion of iron surface[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 582: 123882. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.123882.
- [16] Sancy M, Gourbeyre Y, Sutter E, et al. Mechanism of corrosion of cast iron covered by aged corrosion products: Application of electrochemical impedance spectrometry[J]. Corrosion Science, 2010, 52(4): 1222-1227.
- [17] Yu H T, Li W Y, Song X, et al. The divergency of microbiological influenced corrosion for diverse pipe materials in the drinking water distribution system[J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2023, 16: 100559. DOI: 10.1016/j.cej.2023.100559.
- [18] Zhao L T, Liu D B, Zhang H Y, et al. Study on electrochemical reduction mechanisms of iron oxides in pipe scale in drinking water distribution system[J]. Water Research, 2023, 231: 119597. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119597.
- [19] 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.
- [20] Liu Q Z, Zhang Y, Li G W, et al. Understanding the initial use stage of cement mortar lining in drinking water distribution systems: Silicon and aluminum as stability indicators[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, 135: 495-505. DOI: 10.1016/j.jes.2023.01.025.
- [21] Laleh M, Pathirana M, Tan M Y. Site-specific local polarisation curve measurements for probing localised corrosion and inhibition[J]. Corrosion Science, 2023, 214: 111019. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111019.
- [22] De G M T, Vermeulen P. Advanced characterization of alkaline water electrolysis through electrochemical impedance spectroscopy and polarization curves[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2024, 974: 118709. DOI: 10.1016/j.jelechem.2024.118709.
- [23] Sarin P, Snoeyink V L, Bebee J, et al. Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: Effect of dissolved oxygen[J]. Water Research, 2004, 38(5): 1259-1269.

- [24] Ejbouh A, Ech-Chebab A, Hassi S, et al. Durability assessment of LC3-based reinforced concrete under combined chloride-sulfate environment via the EIS technique [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 366: 130194. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130194.
- [25] Guo H, Wang R, Jiang M H, et al. Cement-mortar lining failure and metal release caused by electrochemical corrosion of ductile iron pipes in drinking water distribution systems[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 152: 488–502. DOI: 10.1016/j.jes.2024.06.003.
- [26] 贾子晔. 过一硫酸盐作用下管道腐蚀产物中铜离子的释放规律及机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
Jia Z Y. Study on the release characteristics and mechanism of copper ions from pipe corrosion products in presence of persulfate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [27] Sun M Q, Yang J, Wang Z B, et al. Effect of coexistence of sulfate reducing bacteria and nitrate reducing bacteria on the under-deposit corrosion of carbon steel[J]. *Corrosion Science*, 2024, 231: 111958. DOI: 10.1016/j.corsci.2024.111958.
- [28] Zhang H Y, Liu D B, Zhao L T, et al. Review on corrosion and corrosion scale formation upon unlined cast iron pipes in drinking water distribution systems [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 117: 173–189. DOI: 10.1016/j.jes.2022.04.024.
- [29] Liu Q Z, Zhuang Y, Zhang Y, et al. Stability of cement mortar lining in drinking water supply pipelines under different hardness and alkalinity conditions[J]. *ACS ES&T Water*, 2022, 2(12): 2519–2527.
- [30] 胡艳华, 酆和生. Ca^{2+} 浓度和碱度对循环水结垢和腐蚀的影响[J]. *石化技术*, 2012, 19(2): 9–11.
Hu Y H, Li H S. The scaling and corrosion in circulated water influenced from alkalinity and concentration of Ca^{2+} [J]. *Petrochemical Technology*, 2012, 19(2): 9–11.
- [31] Bui H T, Maekawa K, Tan K H. Electrochemical corrosion kinetics of steel bars in pseudo-transparent concrete under different alkaline properties and chloride contamination levels [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 421: 135636. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135636.
- [32] Yang S M, Li M, Liu T D, et al. Protective mechanism of carbon dioxide in pipelines for water containing typical corrosive anions[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 188: 654–663. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.121.

(上接第 11 页)

- [42] 文思齐. 基于数据驱动的供水管网独立计量分区快速漏失识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
Wen S Q. Research on rapid leakage identification method for independent metering zoning of water supply network based on data-driven [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [43] Creaco E, Pezzinga G. Embedding linear programming in multi objective genetical algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 69, 308–318. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.10.013.
- [44] De Paola F, Galdiero E, Giugni M. A jazz-based approach for optimal setting of pressure reducing valves in water distribution networks[J]. *Engineering Optimization*, 2016, 48(5): 727–739.
- [45] Gupta A D, Bokde N, Marathe D, et al. Optimization techniques for leakage management in urban water distribution networks[J]. *Water Supply*, 2017, 17(6): 1638–1652.
- [46] 贺兴伟, 刘涛. 水泵供水机组的精准节能变频调度方法[J]. *城镇供水*, 2023(6): 34–38, 33.
He X W, Liu T. Precise energy-saving frequency scheduling method for pumping unit water supply[J]. *City and Town Water Supply*, 2023(6): 34–38, 33.
- [47] 胡诗苑, 高金良, 钟丹, 等. 供水管网实时优化调度深度自注意力强化学习框架[J]. *给水排水*, 2023, 49(7): 135–139.
Hu S Y, Gao J L, Zhong D, et al. Deep self-attention reinforcement learning framework for real-time optimal scheduling of water distribution network [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(7): 135–139.
- [48] 路梦瑶, 刘小莲, 田雨, 等. 水泵加压与有压重力混合输水系统泵阀联合优化调度研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022(9): 1–5.
Lu M Y, Liu X L, Tian Y, et al. Research on the joint optimal operation of the pump valve in pump pressurized and pressurized gravity mixed water conveyance system [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(9): 1–5.
- [49] Shafiee M E, Berglund A, Berglund E Z, et al. Parallel evolutionary algorithm for designing water distribution networks to minimize background leakage [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, 142(5): 7.
- [50] Gupta A D, Kulat K. Leakage reduction in water distribution system using efficient pressure management techniques. Case study: Nagpur, India[J]. *Water Supply*, 2018, 18(6): 2015–2027.
- [51] Monsef H, Naghashzadegan M, Farmani R, et al. Pressure management in water distribution systems in order to reduce energy consumption and background leakage [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 2018, 67(4): 397–403.