朱净昱,张 卉,刘沙沙,等.NaClO-铁氧化细菌耦合作用下的给水管网腐蚀特征与机制 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1407-1416.
Zhu J Y, Zhang H, Liu S S, et al. Corrosion characteristics and mechanism of water distribution networks under the coupling effect of NaClO and iron-oxidizing bacteria [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1407-1416.

NaClO-铁氧化细菌耦合作用下的给水管网腐蚀特征与机制

朱净昱[1],张 卉[1*],刘沙沙[2],冯永嘉[1],贾培馨[1],纪怡梦[1] (1.西安建筑科技大学环境与市政工程学院,陕西 西安 710055;2.联检(江苏)科技股份有限公司,江苏 常州 213000)

摘要: 建立了静态模拟实验系统,以次氯酸钠(NaClO)和铁氧化细菌(IOB) LSS-1 分别作为代表性消毒剂和腐蚀性微生物,研究了两者耦合作用下的总铁浓度、腐蚀速率、腐蚀过程中的电化学特性及腐蚀产物理化特征.结果表明,NaClO 和 LSS-1 耦合作用下会促进铸铁挂片的腐蚀,LSS-1+4.00mg/L NaClO 条件下较无 LSS-1+0mg/L NaClO 条件下 30d 的腐蚀速率增大 0.06mm/a,总铁浓度平均值升高 5.76mg/L;耦合条件下自腐蚀电位(E_0)负移,电流密度(I_0)增大.此外,耦合条件下产生的腐蚀产物主要有 α-FeOOH、β-FeOOH、γ-FeOOH、Fe_2O_3、Fe_3O_4 和 $CaCO_3$.

关键词: 给水管网；铁氧化细菌；微生物腐蚀；消毒剂
中图分类号: X712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2026)03-1407-10

Corrosion characteristics and mechanism of water distribution networks under the coupling effect of NaClO and iron-oxidizing bacteria.

ZHU Jing-yu[1], ZHANG Hui[1*], LIU Sha-sha[2], FENG Yong-jia[1], JIA Pei-xin[1], JI Yi-meng[1] (1.School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China；2.United Testing Inspection & Certification Technology Co., Ltd, Changzhou 213000, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1407~1416

Abstract: This study established a static simulation experimental system, using sodium hypochlorite (NaClO) as a representative disinfectant and iron-oxidizing bacteria (IOB) strain LSS-1as a representative corrosive microorganism, to investigate their combined effects on total iron concentration, corrosion rate, electrochemical characteristics during corrosion, and physicochemical properties of corrosion products. The results indicated that the coupling of NaClO and LSS-1 promoted the corrosion of cast iron coupons. Under the condition of LSS-1 with 4.00mg/L NaClO, the corrosion rate after 30 days increased by 0.06mm/a, and the average total iron concentration increased by 5.76mg/L compared to the condition without LSS-1 and NaClO. Under the coupled condition, the self-corrosion potential (E_0) shifted negatively, and the current density (I_0) increased. Furthermore, the main corrosion products generated under the coupled condition included α-FeOOH, β-FeOOH, γ-FeOOH, Fe_2O_3, Fe_3O_4, and $CaCO_3$.

Key words: water distribution network；iron-oxidizing bacteria；microbial influenced corrosion；disinfectant

铁基给水管道是我国使用最为广泛的供水管材之一,其腐蚀问题是导致管网水质二次污染的主要原因.给水管网中主要存在由消毒剂导致的电化学腐蚀(EC)和由微生物引起的微生物腐蚀(MIC)[1],其腐蚀产物经过长期积累会在管道内壁形成大量管垢,一方面降低了管网的输水能力,另一方面会引发“黄水”现象,严重影响给水管网的安全稳定运行[2].

目前,有关给水管网腐蚀问题的研究主要集中在代表性消毒剂或腐蚀性细菌单独作用下的腐蚀过程.次氯酸钠(NaClO)是最为常见的一种饮用水消毒剂.研究表明, NaClO 通过参与阴极反应,促进 Fe 元素转化为 Fe^{2+},生成的 Fe^{2+}会进一步被 ClO^-氧化为 Fe^{3+},导致腐蚀加剧.但 NaClO 浓度较低时,点蚀坑会发生钝化,从而减缓腐蚀速率[3-6].已有研究发现 NaClO 在无菌环境下会加剧腐蚀,而在有菌的条件下,能够通过抑制腐蚀性细菌的活性减缓腐蚀[7].因此, NaClO 浓度及微生物存在是影响管道腐蚀的重要因素.铁氧化细菌(IOB)是给水管网中主要的腐蚀性细菌之一,目前发现的给水管网 IOB 包括嘉氏铁柄杆菌属(*Gallionella*)、铁细菌属(*Cmothrix*)、纤毛菌属(*Leptothrix*)、球衣菌属(*Sphaerotilus*)及鞘铁细菌(*Siderocapsa*)等[8]. IOB 能够将 Fe^{2+}氧化为 Fe^{3+}从而促进腐蚀,其产物主要是 FeOOH、Fe_2O_3、Fe_3O_4 等[9-11].此外, IOB 还可以为管网当中的硫酸盐还原

收稿日期: 2025-08-03
基金项目: 陕西省自然科学基础研究计划(2025JC-YBMS-563)
* 责任作者, 副教授, zhanghui@xauat.du.cn

菌(SRB)提供适宜的生长环境,进一步加速腐蚀[12].

然而,实际给水管网中消毒剂和腐蚀性微生物是同时存在的.微生物和消毒剂耦合作用下的腐蚀过程十分复杂,管网中的消毒剂余量会影响微生物的生长和腐蚀,同时生物膜的形成也会促进或抑制消毒剂对管道的腐蚀.目前,针对二者耦合作用下的给水管网腐蚀特征和机制尚不十分清楚.

本文通过建立静态模拟实验系统,针对NaClO-铁氧化细菌耦合作用下的给水管网腐蚀特征与机制展开研究,通过电化学分析手段探究了耦合作用下的腐蚀特征,结合扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)和 X 射线荧光光谱(XRF)等,分析了腐蚀产物的物理化学特性,旨在为完善给水管网腐蚀理论、保障安全供水提供参考.

1 材料与方法

1.1 材料与装置

1.1.1 铸铁挂片 采用铸铁挂片模拟铸铁给水管道作为腐蚀实验原材料.铸铁挂片的尺寸为55.00nm×25.00nm×5.00nm,其主要成分和含量为:铁(Fe) 93.23%; 碳(C) 3.58%; 硅(Si) 2.26%; 锰(Mn) 0.81%;磷(P) 0.086%和硫(S) 0.032%.

实验前对其进行预处理,具体操作如下:(1)打磨:使用规格为 180、500、800 和 1200 目的碳化硅砂纸逐级打磨铸铁挂片,去除其表面的腐蚀产物;(2)去脂:用滤纸将铸铁挂片表面油脂擦拭干净,然后在无水乙醇中用脱脂棉擦洗,擦拭干净后用滤纸吸干再置于烘箱内干燥;(3)灭菌:将干燥后的铸铁挂片置于无菌台内,用紫外线照射 30min 作灭菌处理.

预处理结束后用电子天秤称量并记录铸铁挂片重量,用于后续实验.

1.1.2 菌液制备及实验样液配制 (1)菌液制备:用接种环将前期筛选得到的一株 IOB——琼氏不动杆菌 LSS-1 刮取至液体培养基中(培养基成分: 0.50g/L $(NH_4)_2SO_4$ 、 0.50g/L $NaNO_3$ 、 0.50g/L $K_2HPO_4{\cdot}12H_2O$ 、 0.50g/L $MgSO_4{\cdot}7H_2O$ 、 0.50g/L $CaCl_2$、10.00g/L 柠檬酸铁铵、pH 值为 (7.00±0.20)),用封口膜密封后置于恒温振荡培养箱中培养 5d.培养完成后离心(温度: 4℃、转速:8000r/min),弃上清液并用 PBS 缓冲溶液重悬菌体,重复操作两次.

(2)样液配制:配制等量 NaClO 溶液(浓度分别为 0, 1.00, 2.00 和 4.00mg/L),再按 5%的接种比加入制备好的菌液(菌液浓度为$(5.58\pm0.18)\times10^{12}$cell/mL).

1.1.3 模拟实验系统装置 为分别探究无 LSS-1 和 NaClO、仅添加 LSS-1 以及 LSS-1 与 NaClO 耦合条件下的腐蚀特征,将处理后的铸铁挂片用玻璃丝绳挂于 500mL 广口瓶中,使其完全沉浸在实验样液中,加入磁石用封口膜密封,最后将广口瓶放置在磁力搅拌器上(温度:30℃、转速:300r/min)[13].实验对照组选用灭菌后的自来水,每 2d 换一次样液,模拟给水管网的最不利停留时间.

1.1.4 电化学测试装置 采用三电极体系,用 3 根颜色不同的导线连接三电极与电化学工作站,设置参数并测量开路电位(具体参数见实验方法),待开路电位稳定后,进行电化学测试.其中,工作电极为腐蚀 10 和 30d 后的铸铁挂片,辅助电极为铂片电极,参比电极为银/氯化银电极[14].

1.1.5 实验仪器 实验所用仪器如表 1 所示.其他器皿包括烧杯、三角玻璃棒、接种环、塑料培养皿、锥形瓶、移液枪、10.00mL EP 离心管、离心管架、玻璃棒、牛皮纸、橡皮筋和封口膜等.

表 1 仪器设备汇总

Table 1 Instrument and equipment table

仪器名称	仪器型号	生产厂家
多参数水质分析仪	HQ30d	美国 HACH 公司
恒温振荡培养箱	BS-1EA	常州国华电器有限公司
浊度仪	2100Q	美国 HACH 公司
余氯仪	PC II	美国 HACH 公司
高压蒸汽灭菌锅	LDZX-50KBS	上海申安医疗器械厂
无菌操作台	CJ-1	天津泰斯特仪器有限公司
电子分析天平	FA2004	上海精科
电化学工作站	PAR2273	阿美特克公司
紫外可见分光光度计	UV2600A	上海尤尼柯仪器公司
真空冷冻干燥机	DZ-2BC	天津市泰斯特仪器有限公司
扫描电子显微镜	Sigma 300	德国蔡司股份有限公司
X 射线衍射仪	UItima IV	日本理学株式会社
X 射线荧光光谱仪	Axios	荷兰帕纳科有限公司
低温湘式离心机	L-550	湖南湘仪
流式细胞仪	BD Accuri C6	美国 BD 公司

1.2 实验方法

本实验所用容器均经过灭菌处理,所有操作均在无菌条件下展开.实验共分为 5 组,即无 LSS-1+0mg/L NaClO 、 LSS-1+0mg/L NaClO 、 LSS-1+1.00mg/L NaClO 、 LSS-1+2.00mg/L NaClO 和 LSS-1+4.00mg/L NaClO.具体操作过程如下:

(1)将各组样液倒入模拟实验系统中,设置恒定温度及转速开始实验.每 2d 换一次样液,每隔 2h 取样检测总铁浓度,共取 15 次.同时,测定添加细菌 LSS−1 样液 2d 后的细菌活性.

(2)将不同实验条件下反应 10 和 30d 后的铸铁挂片取出,进行电化学测试,即极化曲线和电化学阻抗(EIS)测定.

(3)将各实验条件下反应 10, 20, 30d 时的铸铁挂片取出,去除表面腐蚀产物后测定其重量,计算挂片的平均腐蚀速率.此外,采集 30d 的腐蚀产物,将其在无氧条件下研磨成粉末,并通过 SEM、XRD、XRF 分析腐蚀产物的微观形貌、晶相组成和元素组分.

1.3　测定方法

1.3.1　细菌活性的测定　采用 BD Accuri C6 流式细胞仪测定反应2d后添加LSS−1样液的细菌活性,实验样品通过碘化丙啶(PI)和 SYBR Green (SG)进行双染[15].

1.3.2　平均腐蚀速率的计算　采用失重法计算铸铁挂片的均匀腐蚀速率.计算公式如下[16-17]:

$$v=\frac{87600(m_0-m)}{st\rho} \tag{1}$$

式中:v 为平均腐蚀速率, mm/a;m_0 为铸铁片腐蚀前质量, g;m 为铸铁片腐蚀后的质量, g;s 为铸铁片的表面积, cm^2;t 为腐蚀时间, h;ρ为铸铁挂片的密度, g/cm^3;87600 为单位换算常数.

1.3.3　总铁浓度的测定　在采样后立即将样品用盐酸酸化至 pH<1,分析时取 10mL 样液于 150mL 锥形瓶中,加入蒸馏水至 50mL,再加(1+3)盐酸 1mL、10%盐酸羟胺溶液 1mL、玻璃珠 1~2 粒,加热煮沸至体积减少到 15mL 左右,以保证全部铁的溶解和还原.若仍有沉淀应过滤除去.冷却至室温,定量转移至 50mL 具塞比色管中.加一小片刚果红试纸,滴加饱和乙酸钠溶液至试纸刚刚变红,加入 5mL 缓冲溶液、0.5%邻菲啰啉溶液 2mL,加水至标线,摇匀.显色 15min 后,用 10mm 比色皿,以纯水为参比,采用紫外可见分光光度计在 510nm 处测量吸光度,由经过空白校正的吸光度对铁的含量作图[18].

1.3.4　铸铁电极的电化学特性分析　(1)极化曲线:采用 PAR2273 电化学工作站测定极化曲线,选用公式如下[19]:

$$i=i_{\mathrm{corr}}\left[\exp\left(\frac{\varphi-\varphi_{\mathrm{corr}}}{\beta_{\mathrm{a}}}\right)-\exp\left(\frac{\varphi-\varphi_{\mathrm{corr}}}{\beta_c}\right)\right] \tag{2}$$

式中:i 为极化电流密度, mA/cm^2;i_{corr} 为腐蚀电流密度, mA/cm^2;φ−φ_{corr} 为极化电位, V;β_{a} 为阳极菲塔尔斜率;β_{b} 为阴极极菲塔尔斜率.

测试中设置的参数包括:初始电位相对开路电位−0.10V,终止电位相对开路电位 0.10V,测试电位间隔 0.50mV,扫描速度 0.50mV/s.数据采用 Origin 2019 软件进行拟合分析.

(2)EIS 分析:利用 PAR2273 电化学工作站测定 EIS,其结果以奈奎斯特(Nyquist)图呈现.其等效电路图如图 1 所示.其公式如下:

$$Z(\omega)=R_{\mathrm{s}}+\frac{1}{Y_{0,\mathrm{f}}\cdot(j\omega)^{n_{\mathrm{f}}}+\frac{1}{R_{\mathrm{bf}}}}+\frac{1}{Y_{0,\mathrm{dl}}\cdot(j\omega)^{n_{\mathrm{dl}}}+\frac{1}{R_{\mathrm{ct}}}}\quad(j=-1^2) \tag{3}$$

式中:$Z(\omega)$为总阻抗, Ω;ω 为角频率, rad/s;R_{s} 为溶液电阻, Ω;R_{bf} 为膜电阻, Ω;R_{ct} 为极化电阻, Ω;$Y_{0,\mathrm{f}}$ 为常相位元件 CPE1 的导纳参数, S•s;$Y_{0,\mathrm{dl}}$ 为常相位元件 CPE2 的导纳参数, $S\bullet s^n$;n_{f} 为常相位元件 CPE1 的相位指数;n_{dl} 为常相位元件 CPE2 的相位指数.

测试中设置的参数包括:初始频率 100000Hz 终止频率 0.01Hz、交流幅值 10.00mV,每个样品重复测量 3 次.

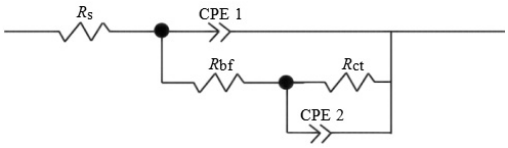


图 1　EIS 拟合等效电路示意

Fig.1　Equivalent circuit for EIS fitting

R_{s}: 溶液电阻; R_{bf}: 膜电阻; R_{ct}: 极化电阻;CPE1: 常相位元件 1; CPE2: 常相位元件 2

1.3.5　腐蚀产物理化特性分析　(1)SEM:取出腐蚀后的挂片,在不破坏其表面形貌的前提下将其切割成一小块,用 DZ−2BC 真空冷冻干燥机进行冷冻干燥,再作喷金处理(喷金参数为:电流 5mA,时间 180s).预处理后用 Sigma 300 扫描电子显微镜对挂片表面腐蚀产物的不同形貌进行拍照(放大倍率:5000 倍).

(2)XRD:将冷冻干燥后的腐蚀挂片,放入厌氧箱,用灭菌后的刀片刮取腐蚀产物,并研磨成粉.利用 UItima IVX 射线衍射仪检测(波长: 0.15406nm、电压: 40kV、电流: 40mA、扫描范围:5°~90°、扫描速

度: 10(°)/min),并用 Jade 6 软件进行分析[14].

(3)XRF:采用 Axios 型号 X 射线荧光光谱仪检测腐蚀产物的元素组成.

2 结果与讨论

2.1 细菌活性和 NaClO 衰减特性

由图 2 可以看出, LSS-1 在不同浓度 NaClO 条件下均能够保持一定活性, 3 种浓度下的活菌占比分别为 84.4%、48.4%和 15.1%.一方面,由于 NaClO 在水中发生衰减,有效浓度降低,使得其对细菌的灭活作用减弱;另一方面,细菌 LSS-1 产生的胞外聚合物(EPS)能够对细菌起到保护作用,降低 NaClO 的渗透与作用效果[20].因此,在 2d 的换水周期内, NaClO 与存活的 LSS-1 共同对铸铁挂片的腐蚀过程产生影响[10].

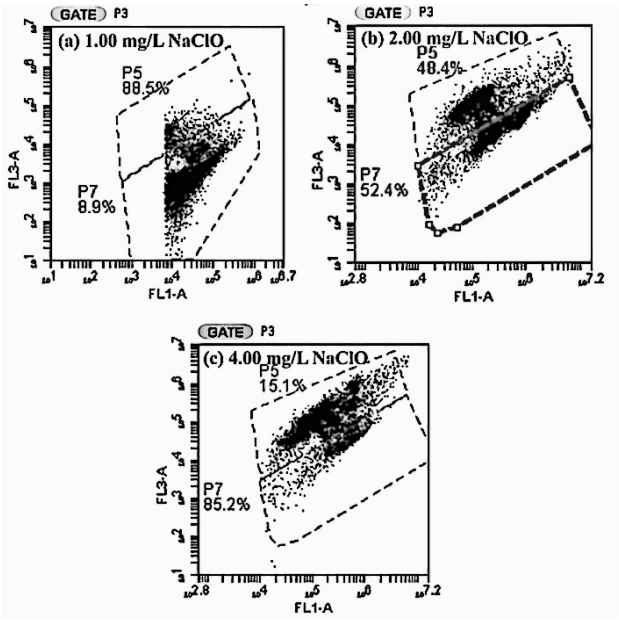


图 2 不同浓度 NaClO 作用 2d 后的细菌 LSS-1 活性

Fig.2 The activity of LSS - 1after 2 days under different concentrations of NaClO

2.2 平均腐蚀速率

如图 3 和表 2 所示,30d 时的腐蚀速率具有统计学显著性(P<0.05),而 10 和 20d 时腐蚀速率受随机误差影响较大.可以看出,前期由于反应没有达到平衡,腐蚀速率处于动态变化阶段,而后期腐蚀逐渐达到稳定,腐蚀速率波动显著降低.

无 LSS-1+0mg/L NaClO 、 LSS-1+0mg/L NaClO、LSS-1+1.00mg/L NaClO、LSS-1+2.00mg/L NaClO 和 LSS-1+4.00mg/L NaClO 条件下, 10d 的平均腐蚀速率分别为 0.68, 0.73, 0.76, 0.81, 0.82mm/a, 20d 时分别为 0.26, 0.28, 0.30, 0.31, 0.32mm/a, 30d 时分别为 0.20, 0.21, 0.22, 0.24, 0.26mm/a.由此可见, NaClO 与 LSS-1 共存时,其腐蚀速率高于无 LSS-1 和无 NaClO 组以及 LSS-1 单独作用下的腐蚀速率,其原因主要是 NaClO 所释放的 ClO^-具有强氧化性,能够促进 Fe 元素转化为 Fe^{2+};同时, NaClO 为部分铁氧化细菌 LSS-1 的生存和代谢提供了环境,二者通过“电化学氧化-微生物催化”的协同循环推动腐蚀加剧,进一步将 Fe^{2+}氧化为 Fe^{3+}[3,21],具体反应见式(4)~(6).另外随着 NaClO 浓度的升高, NaClO 与 LSS-1 耦合作用下的腐蚀速率不断增大.主要是因为 ClO^-浓度升高其氧化性增强,并且也为 LSS-1 的铁氧化代谢提供更多电子供体,使得腐蚀速率变大.

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} \quad (4)$$

$$Fe^{2+} + ClO^- + H_2O \rightarrow 2Fe^{3+} + Cl^- + 2OH^- \quad (5)$$

$$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \xrightarrow{\text{LSS-1}} 4Fe^{3+} + 2H_2O \quad (6)$$

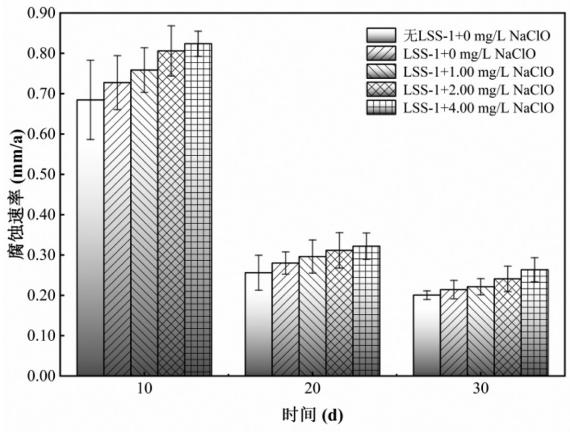


图 3 不同条件下铸铁挂片的平均腐蚀速率

Fig.3 Corrosion rates of cast iron coupons under different conditions

此外,所有条件下的腐蚀速率均随时间的增加而减小.无 LSS-1+0mg/L NaClO、LSS-1+0mg/L NaClO、LSS-1+1.00mg/L NaClO、LSS-1+2.00mg/L NaClO 和 LSS-1+4.00mg/L NaClO 条件下, 20d 时平均腐蚀速率比 10d 时分别下降 61.76%、61.64%、60.53%、61.73%和 60.98%, 30d 时平均腐蚀速率比 20d 时分别下降 23.08%、25.00%、26.67%、22.58%和 18.75%.导致腐蚀速率下降的主要原因是随着时间的推移,腐蚀产物的形成使得铸铁挂片表面形成

了保护层,从而减缓了腐蚀[1,21].

投加铁氧化细菌 LSS−1 能够加快腐蚀,10, 20 和 30d 的腐蚀速率分别比无菌条件下提高了 7.35%、7.69%和 5.00%.LSS−1 既能够通过酶促反应氧化 Fe^{2+},也能够与铸铁挂片表面形成局部原电池导致腐蚀[22].同时,两组条件下腐蚀速率的差异随时间增加而逐渐减小,其原因可能是实验后期铸铁挂片表面形成了生物膜,一方面对金属表面起到了保护作用,另一方面阻隔了 O_2 的供给,从而减缓腐蚀[20].

表 2　不同条件下铸铁挂片的腐蚀速率分析

Table 2　Analysis of corrosion rate of cast iron coupons under different conditions

组别	时间 (d)	腐蚀速率 (mm/a)				平均腐蚀速率(mm/a)	标准差	差异性分析
1		0.75	0.55	0.76	0.68	0.68	0.10	显著性水平 (α=0.05) F=2.74 P=0.07
2		0.79	0.70	0.64	0.77	0.73	0.07	
3	10	0.80	0.79	0.68	0.76	0.76	0.06	
4		0.75	0.88	0.74	0.86	0.81	0.06	
5		0.84	0.79	0.80	0.86	0.82	0.03	
1		0.28	0.28	0.26	0.19	0.26	0.04	显著性水平 (α=0.05) F=1.85 P=0.17
2		0.28	0.25	0.28	0.31	0.28	0.03	
3	20	0.26	0.27	0.30	0.35	0.30	0.04	
4		0.27	0.31	0.37	0.29	0.31	0.04	
5		0.35	0.30	0.35	0.29	0.32	0.03	
1		0.19	0.20	0.20	0.22	0.20	0.01	显著性水平 (α=0.05) F=3.36 P=0.04
2		0.25	0.20	0.20	0.21	0.21	0.02	
3	30	0.22	0.23	0.24	0.19	0.22	0.02	
4		0.20	0.22	0.26	0.28	0.24	0.03	
5		0.24	0.30	0.24	0.27	0.26	0.03	

注:1~5组分别对应的条件为无LSS−1+0mg/L NaClO、LSS−1+0mg/L NaClO、LSS−1+1.00mg/L NaClO、LSS−1+2.00mg/L NaClO和LSS−1+4.00mg/L NaClO. F=组间方差/组内方差,表示1~5五种实验条件导致的腐蚀速率差异与同一条件下重复实验的随机误差的比值; P值表示1~5五种实验条件对铸铁挂片的腐蚀速率无真实影响,观测到的组间差异仅由随机误差导致的概率.

2.3　总铁浓度

图 4 显示,各条件下的总铁浓度均呈现先升高后降低并最终趋于稳定的趋势,且在 16d 时达到最大值.无 LSS−1+0mg/L NaClO、LSS−1+0mg/L NaClO、LSS−1+1.00mg/L NaClO、LSS−1+2.00mg/L NaClO 和 LSS−1+4.00mg/L NaClO 条件下,总铁浓度的最大值分别为 9.12, 12.56, 17.22, 18.31, 19.30mg/L.前期 NaClO 浓度较高,氧化性较强,通过电化学及微生物腐蚀使得溶液中铁含量不断上升[3,21],在16d后,生物膜的形成减缓了铸铁挂片的腐蚀[9].除此之外,后期腐蚀产物由 $Fe(OH)_2$、γ−FeOOH、Fe_2O_3 等转变为致密的 Fe_3O_4 等沉淀,从而降低了腐蚀速率,具体反应见式(7)~(9)[5,23].

$$6Fe(OH)_2+O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4+6H_2O \quad (7)$$

$$3\gamma\text{-}FeOOH+H^++e^- \rightarrow Fe_3O_4+2H_2O \quad (8)$$

$$3Fe_2O_3+2H^++2e^- \rightarrow 2Fe_3O_4+H_2O \quad (9)$$

5 种条件下的总铁浓度平均值分别为 6.09, 7.18, 9.45, 10.34, 11.85mg/L.因此, NaClO 与细菌 LSS−1 耦合条件下的总铁浓度高于其他条件,主要是二者耦合作用促进了铸铁挂片的腐蚀,使得水中总铁含量增大.此外,随着 NaClO 浓度的升高,平均总铁浓度增大,主要是耦合作用下腐蚀加剧的结果.与此同时,投加铁氧化细菌 LSS−1 后,水中总铁浓度比无菌条件下平均升高了 17.90%,亦是 LSS−1 促进腐蚀的结果.

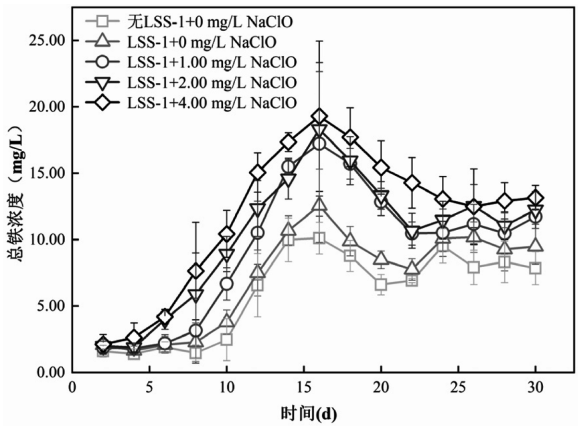


图 4　不同条件下水样总铁浓度随时间变化

Fig.4　Total iron concentration in corrosive medium under different conditions

2.4　铸铁电极的电化学特性

图 5(a)和表 3 所示, 10d 时,无 LSS−1+0mg/L NaClO 条件下电极的自腐蚀电位(E_0)为−723.502mV,腐蚀电流密度(I_0)为 9.55×10^{-6}A/cm^2.仅添加 LSS−1 条件下的 E_0 为−726.644mV, I_0 为 1.08×10^{-5}A/cm^2.因此,添加LSS−1 使得 E_0 负移,且 I_0 增大,进一步说明了 LSS−1 对腐蚀的促进作用.此外,同时添加 NaClO 和 LSS−1,二者的耦合作用使得 E_0 负移, I_0 增大,腐蚀速率增大,同样说明了 NaClO 和 LSS−1 耦合作用能够促进腐蚀,且初始NaClO浓度越高,促进作用越明显.

如图5(b)和表3所示,与10d的情况类似, NaClO 和 LSS−1 共存时, E_0 负移, I_0 增大,腐蚀加剧,且 NaClO 浓度越高,腐蚀越严重.

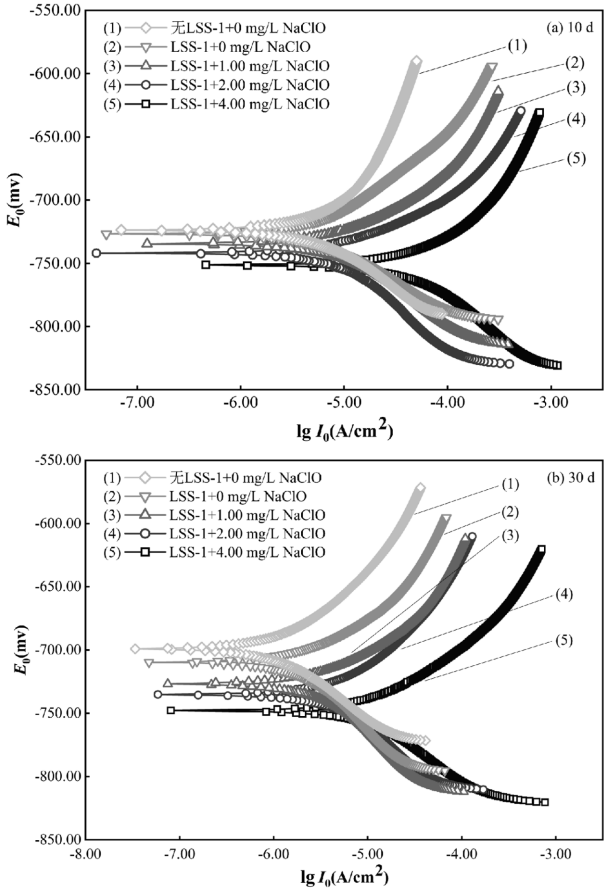


图 5 不同条件下铸铁挂片极化曲线

Fig.5 Polarization curves of cast iron coupons under different conditions

表 3 极化曲线拟合结果

Table 3 Polarization curve fitting results table

时间(d)	组别	β_a (mV)	β_c (mV)	I_0 (A/cm^2)	E_0 (mV)
10	1	69.4774	65.75216	9.55×10^{-6}	−723.502
	2	53.86479	57.81114	1.08×10^{-5}	−726.644
	3	52.93438	62.53185	1.85×10^{-5}	−734.658
	4	55.51238	78.46142	2.45×10^{-5}	−741.917
	5	63.36772	68.5366	4.52×10^{-5}	−751.159
30	1	86.03262	35.5429	1.75×10^{-6}	−720.053
	2	68.84235	59.04675	2.50×10^{-6}	−723.144
	3	50.09295	80.50762	3.33×10^{-6}	−726.975
	4	75.7374	70.05678	5.28×10^{-6}	−735.182
	5	52.37765	54.28556	1.98×10^{-5}	−747.818

30d 时,无 LSS−1+0mg/L NaClO 条件下的 E_0 为 −720.053mV, I_0 为 1.75×10^{-6}A/cm^2,比 10d 时 E_0 和 I_0 分别增大了 3.449mV 和减小了 7.80×10^{-6}A/cm^2,可见实验后期腐蚀速率降低,这与腐蚀速率的结果一致. 同样地,其他条件下 30d 的 E_0 分别比 10d 时增大了 0.48%、0.48%、1.05%、0.91%、0.44%,也证实了该结论.

如图 6(a)和表 4 所示,5 种条件下的交流阻抗谱图均由高频区容抗弧和低频区容抗弧组成,说明反应体系中有两个时间常数.高频区容抗弧与腐蚀产物、LSS−1 在腐蚀产物表面的生长繁殖、代谢产物和生物膜有关,而低频区容抗弧与电荷转移有关.

对比 R_s(溶液电阻)、R_{bf}(膜电阻)和 R_{ct}(极化电阻),发现 R_{ct} 远远大于 R_s、R_{bf},说明 R_{ct} 在腐蚀过程中起主要作用.

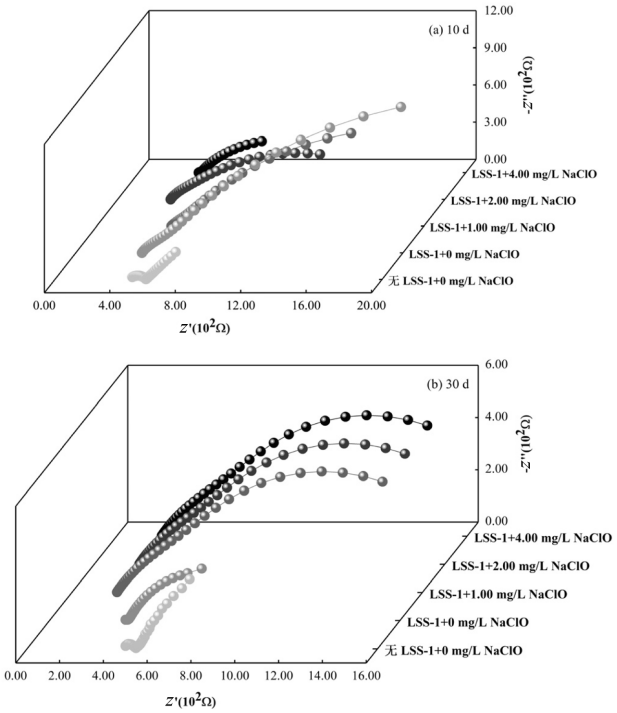


图 6 不同条件下铸铁挂片的 EIS 图

Fig.6 EIS of cast iron coupons under different conditions

无 LSS−1+0mg/L NaClO 条件下,EIS 图中出现了 Warburg 现象(低频区呈现近似 45°的倾斜直线),由于没有生物膜及 NaClO 的作用,电极表面未形成有效的保护性氧化层或腐蚀产物膜,导致电化学性能较差,腐蚀反应的速率不受电荷转移过程主导,电极表面的电化学性能差使得溶液中扩散过程成为腐蚀过程的中最重要的一步. LSS−1+0mg/L NaClO 条件下, R_s、R_{bf} 和 R_{ct} 均降低,表明 LSS−1 能够促进腐蚀.

投加 LSS−1 和 NaClO 条件下,随着 NaClO 浓度的增大, R_s 和 R_{ct} 降低,表明 NaClO 和 LSS−1 耦合后进一步提升腐蚀速率,且浓度越高,腐蚀速率

越大,这与前面的研究结果一致. LSS−1+1.00mg/L NaClO 条件下 R_{bf} 出现波动的原因可能是投加 NaClO 破坏了部分生物膜,但 ClO^-的强氧化性又显著降低了 R_{ct}.整体来看,腐蚀速率比 LSS−1+0mg/L NaClO 条件下大.

如图 6(b)和表 4 所示,与 10d 时一样,腐蚀过程中主要由 R_{ct} 控制.投加 NaClO 后, NaClO 和 LSS−1 耦合条件下 R_s、R_{bf} 和 R_{ct} 进一步降低,且随着 NaClO 浓度的增大,腐蚀速率增大,说明二者增大腐蚀速率.

30d 时低频区容抗弧尾部弯曲较明显,说明挂片中出现了局部腐蚀现象,主要是由于生物膜分布不均以及后期腐蚀产物变化导致的.

表 4　各实验组 EIS 的等效电路拟合结果

Table 4　Equivalent circuit fitting results of EIS for each experimental group

时间 (d)	组别	R_s (Ω)	CPE1 ($S•s^n$)	n_f	R_{bf} (Ω)	CPE2 ($S•s^n$)	n_{dl}	R_{ct} (Ω)
10	1	45.0	4.74×10^{-8}	0.7225	587.7	1.70×10^{-3}	0.7825	2703
	2	44.4	9.65×10^{-8}	0.7041	420.4	1.71×10^{-3}	0.6810	2609
	3	43.5	1.93×10^{-7}	0.5977	453.6	1.59×10^{-3}	0.7204	2527
	4	42.5	8.19×10^{-8}	0.6581	365.3	3.11×10^{-3}	0.5457	2193
	5	37.8	4.54×10^{-7}	0.5495	428.3	1.43×10^{-3}	0.6361	1863
30	1	45.1	1.43×10^{-6}	0.7001	504.3	2.28×10^{-2}	0.7430	1697
	2	44.5	1.18×10^{-6}	0.7074	373.1	1.67×10^{-2}	0.6896	1487
	3	42.7	1.81×10^{-6}	0.5204	235.4	1.75×10^{-2}	0.7398	1291
	4	36.7	4.12×10^{-6}	0.478	227.4	4.07×10^{-2}	0.7760	1204
	5	25.5	1.23×10^{-6}	0.5745	212.9	2.36×10^{-2}	0.8353	1157

2.5　腐蚀产物理化特性

2.5.1　微观形貌　如图 7 所示,无 LSS−1+0mg/L NaClO 条件下腐蚀产物主要有簇状小球(Fe_3O_4)[24-25],针状结构(α−FeOOH)[26-27],且含有少量的片状结构(γ−FeOOH 和 Fe_2O_3)[28-29]; LSS−1+0mg/L NaClO 条件下有很多团簇状物质(Fe_3O_4)[25],以及很多针状结构物质(α−FeOOH),片状结构(γ−FeOOH 和 Fe_2O_3)略有增多; LSS−1+1.00mg/L NaClO 条件下,主要可以看出有球状(Fe_3O_4)、片状(γ−FeOOH 和 Fe_2O_3),并且此时出现了棒状结构(β−FeOOH)[30]; LSS−1+2.00mg/L NaClO 条件下的腐蚀产物主要有簇状小球(Fe_3O_4),还有一些针状矿物(α−FeOOH)和片状矿物(γ−FeOOH 和 Fe_2O_3); LSS−1+4.00mg/L NaClO 条件下的腐蚀产物有簇状小球(Fe_3O_4)、棒状矿物(α−FeOOH 和 β−FeOOH)[30-31]以及片状矿物(γ−FeOOH 和 Fe_2O_3).

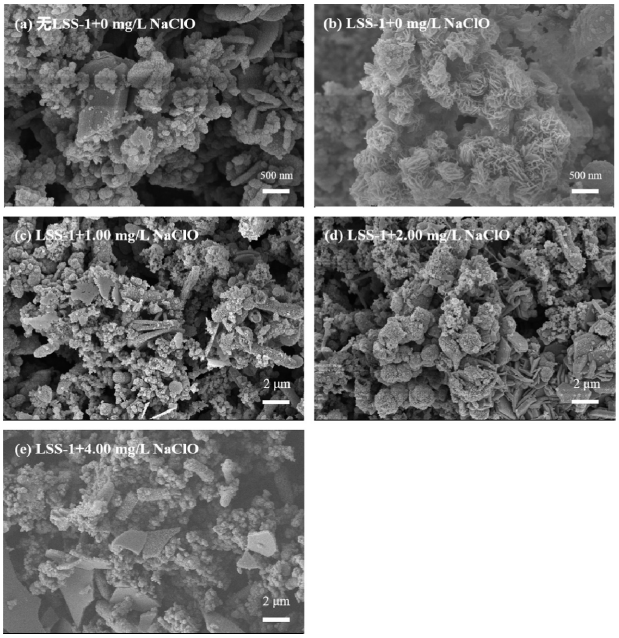


图 7　不同条件下腐蚀产物的 SEM 图(30d)

Fig.7　SEM of corrosion products under different conditions(30d)

2.5.2　晶相组成　如图 8 和表 5 所示.可以看出,腐蚀产物主要由 α−FeOOH、γ−FeOOH、Fe_2O_3、Fe_3O_4 和 $CaCO_3$ 组成.特别地,当铁氧化细菌和 NaClO 共同作用时,产物中出现了 β−FeOOH.此外,随着 NaClO 浓度的升高, γ−FeOOH 的峰强逐渐增大,这两种晶相是腐蚀产物中较不稳定的部分[32-33],易脱落至水中引起出水的总铁含量升高.

30d 各组腐蚀产物中 α−FeOOH 和 Fe_3O_4 晶相含量最高,无 LSS−1+0mg/L NaClO、LSS−1+0mg/L NaClO、LSS−1+1.00mg/L NaClO、LSS−1+2.00mg/L NaClO 和 LSS−1+4.00mg/L NaClO 条件下,两种晶相的占比分别为 75.65%、75.47%、70.83%、67.09%和 61.86%,各组占比均超 60%.这两种晶相是腐蚀产物中较为稳定的部分,在外层能够减缓腐蚀的进行,这一结果也与前文相呼应.

无 LSS−1 和 NaClO 的实验条件下腐蚀产物的 α−FeOOH 和 Fe_3O_4 峰最高,且峰的尖锐程度最大,说明晶相的含量和结晶度最高,说明该条件下的腐蚀产物结构是五种条件下最稳定的.NaClO 和 LSS−1 耦合后 α−FeOOH 和 Fe_3O_4 占比从 75.47%减少至 70.84%, β−FeOOH 和 γ−FeOOH 含量占比从 8.08%增大至 13.46%,此时铸铁挂片变得更加疏松,更易腐蚀,也印证了前文 NaClO 和 LSS−1 耦合条件下腐蚀速率增大.除此之外,腐蚀产物中 $CaCO_3$ 来源于水中

硬度离子 Ca^{2+}和 CO_3^{2-}的沉积[5],其含量整体变化不大.

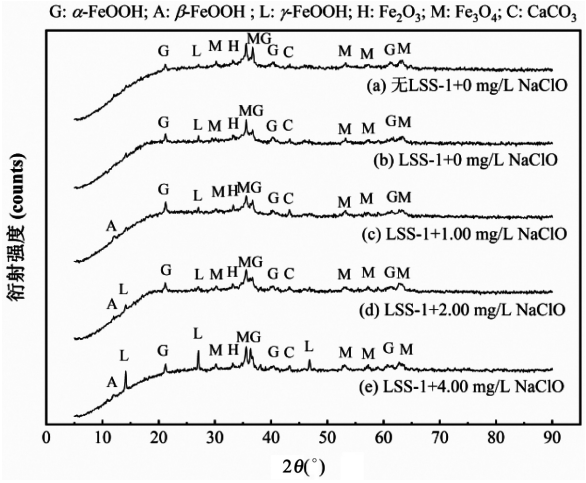


图 8 不同条件下腐蚀产物的 XRD 图(30d)

Fig.8 XRD of corrosion products under different conditions(30d)

表 5 不同条件下腐蚀产物晶体组成(%)

Table 5 Crystalline compositions of corrosion products under different conditions (%)

物质	1	2	3	4	5
α-FeOOH	33.59	33.66	31.62	29.92	27.20
β-FeOOH	0	0	5.81	5.24	4.87
γ-FeOOH	8.00	8.08	7.65	13.16	19.92
Fe_2O_3	8.35	8.40	8.12	7.42	6.79
Fe_3O_4	42.07	41.81	39.22	37.16	34.66
$CaCO_3$	7.98	8.04	7.58	7.09	6.56

2.5.3 元素组成 如表 6 所示,5 个实验组中腐蚀产物中的 Fe 元素含量占比最高,均超过了 92%,这是由于腐蚀产物主要为铁的氧化物.Si 和 Ca 元素含量均大于 1%,其余元素占比均小于 1%.此外,随着 LSS-1 和 NaClO 的加入,腐蚀产物中 Fe 元素含量略有下降,推测是部分 β-FeOOH 和 γ-FeOOH 落入水中,这与前文出水中总铁浓度变化以及 XRD 结果相吻合.Si 元素含量增加的原因推测是前期铸铁挂片生产工艺中的 Si 元素腐蚀溶解至水中,后期腐蚀又产生了 SiO_2 吸附在铸铁挂片表面[34],但在 XRD 分析中,并未检测出明显的 SiO_2 特征峰,可能因为产生的 SiO_2 为非晶体不能产生尖锐、明显的衍射峰或被其他腐蚀产物的特征峰掩盖[35].除此之外,加入 LSS-1 后 P 元素含量增加,推测是源于 LSS-1 附着在铸铁挂片表面生成的生物膜[36];S 元素在加入 NaClO 后有所减少,可能是强氧化性 ClO^-将腐蚀产物中的 S 化合物氧化[37],导致腐蚀产物中 S 元素含量下降.由此可见, LSS-1 和 NaClO 均会影响腐蚀进程,两者耦合增大了腐蚀速率并且改变了腐蚀产物结构.

表 6 不同条件下铸铁挂片表面腐蚀产物中各元素占比(%)

Table 6 Proportion of each element in the corrosion products on the surface of cast iron coupons under different conditions(%)

元素	1	2	3	4	5
Fe	93.51	93.26	93.16	92.52	92.88
Si	3.33	3.38	4.44	4.64	4.62
Ca	1.89	1.54	1.13	1.73	1.25
Mn	0.396	0.395	0.346	0.378	0.39
P	0.0487	0.312	0.303	0.3	0.276
Mg	0.137	0.115	0.135	0.159	0.131
Zn	0.116	0.084	0.106	0.0956	0.128
Cl	0.0115	0.0334	0.0473	0.0555	0.0604
S	0.265	0.289	0.0541	0.049	0.0581
Dy	0.061	0.081	0.088	–	0.037
Al	0.0125	0.0234	0.0397	0.0291	0.0316
Tm	0.0345	0.0258	0.0436	–	0.0244
Ti	0.0122	0.0119	0.0184	0.0191	0.0233
Tb	0.0335	0.0388	0.0342	–	0.0218
Th	–	0.0141	–	–	0.0118
Cr	0.0029	–	0.0077	0.01	0.011
K	–	0.0109	0.0106	0.0073	0.0107
Ni	0.0073	–	0.0127	0.0127	0.0116
Cu	0.0061	–	0.0107	0.0141	0.0056
Sr	0.0061	0.0044	0.006	–	0.0045
Na	–	–	–	0.319	0.104
V	–	0.0021	–	–	–
Nb	–	–	0.0038	–	–
Sm	–	–	–	0.0211	–

注: “–”表示未检出.

3 结论

3.1 NaClO 与 LSS-1 的耦合作用会促进铸铁挂片的腐蚀.无 LSS-1+0mg/L NaClO、LSS-1+0mg/L NaClO、LSS-1+1.00mg/L NaClO、LSS-1+2.00mg/L NaClO 和 LSS-1+4.00mg/L NaClO 条件下, 10d 的平均腐蚀速率分别为 0.68, 0.73, 0.76, 0.81, 0.82mm/a, 20d 时分别为 0.26, 0.28, 0.30, 0.31, 0.32mm/a, 30d 时分别为 0.20, 0.21, 0.22, 0.24, 0.26mm/a.

3.2 腐蚀初期(10d 前)平均腐蚀速率较快,随着时间推移逐渐降低, 5 种条件下 20d 时平均腐蚀速率比 10d 时分别下降 61.76%、61.64%、60.53%、61.73% 和 60.98%, 30d 时平均腐蚀速率比 20d 时分别下降

23.08%、25.00%、26.67%、22.58%和 18.75%.

3.3　NaClO 与 LSS−1 耦合作用时,总铁浓度升高, 5 种条件下的总铁浓度最大值分别为 9.12, 12.56, 17.22, 18.31 和 19.30mg/L.

3.4　NaClO 与 LSS−1 耦合作用使得 E_0 负移, I_0 增大,腐蚀速率增大,且初始 NaClO 浓度越高,促进作用越明显.

3.5　NaClO 与 LSS−1 耦合会加速管网腐蚀的主要机制为 NaClO 促进 Fe 氧化为 Fe^{2+},为 LSS−1 的生存和代谢提供了环境,通过电化学和微生物的共同作用,进一步加剧了管网腐蚀.

3.6　NaClO 耦合 LSS−1 作用下腐蚀产物主要有 α−FeOOH、β−FeOOH、γ−FeOOH、Fe_2O_3、Fe_3O_4 和 $CaCO_3$,且 β−FeOOH 的含量随 NaClO 浓度的增大而增加, 而 α−FeOOH 和 Fe_3O_4 的含量则不断减少.

参考文献：

[1] 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.

[2] 王　斌,张正洪,程　亚,等.西北地区某市地下水供水管网黄水产生原因分析与控制技术中试研究 [J]. 给水排水, 2024,60(5):118−127.
Wang B, Zhang Z H, Cheng Y, et al. Cause analysis and control technology pilot study of yellow water in a groundwater water supply network in a city in northwest China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024,60(05):118−127.

[3] 陈灏琳,田一梅,郭　浩,等.NaClO 对再生水球墨铸铁管道腐蚀行为的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017,29(1):41−47.
Chen H L, Tian Y M, Guo H, et al. Effect of sodium hypochlorite on corrosion behavior of ductile cast iron pipe in reclaimed water [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017,29(1):41−47.

[4] Zhang H Y, Tian Y M, Guo H, et al. Electrochemical corrosion of cast iron pipes in reclaimed water containing disinfectant [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018,13(9):9069−9084.

[5] Zhang H Y, Zhao L T, Liu D B, et al. Early period corrosion and scaling characteristics of ductile iron pipe for ground water supply with sodium hypochlorite disinfection [J]. Water Research, 2020,176: 115742.

[6] Fei Sun, Na Zhang, Shen Chen, et al. Effect of temperature and NaClO on the corrosion behavior of copper in synthetic tap water [J]. Metals, 2024,14(5):543.

[7] Su W, Tian Y M, Peng S. The influence of sodium hypochlorite biocide on the corrosion of carbon steel in reclaimed water used as circulating cooling water [J]. Applied Surface Science, 2014,315: 95−103.

[8] 杨宏涛,丛　苹,周荣敏.城市给水管网腐蚀机理及防护措施 [J]. 管道技术与设备, 2008,(3):50−51,62.
Yang H T, Cong P, Zhou R M. Mechanics of corrosion on pipe networks of water supply and prevention measures [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2008,(3):50−51,62.

[9] 吕亚林,刘宏伟,熊福平,等.铁氧化菌对 X80 管线钢腐蚀行为的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017,29(4):343−348.
Lv Y L, Liu H W, Xiong F P, et al. Corrosion behavior of X80pipeline steel in oil−field produced water containing iron oxidizing bacteria [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017,29(4):343−348.

[10] 刘宏伟,刘宏芳.铁氧化菌引起的钢铁材料腐蚀研究进展 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017,37(3):195−206.
Liu H W, Liu H F. Research progress of corrosion of steels induced by iron oxidizing bacteria [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017,37(3):195−206.

[11] Yue Y Y, Lv M Y, Du M. The corrosion behavior and mechanism of X65steel induced by iron−oxidizing bacteria in the seawater environment [J]. Materials And Corrosion−Werkstoffe Und Korrosion, 2019,70(10):1852−1861.

[12] 邱丽娜,张玮玮,弓爱君,等.腐蚀微生物种类及腐蚀机理研究进展 [J]. 工程科学学报, 2023,45(6):927−940.
Qiu L N, Zhang W W, Gong A J. Species of corrosive microbes and corrosion mechanisms [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023,45(6): 927−940.

[13] 王怡怡.给水铸铁管道中腐殖酸对氧化微杆菌的腐蚀特性影响研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2021.
Wang Y Y. Effect of humic acid on corrosion characteristics of *Microbacterium oxydans* on cast iron pipes [D]. Xi'an, China: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.

[14] 张海亚.消毒剂—微生物耦合作用下再生水管道腐蚀机理研究 [D]. 天津:天津大学, 2017.
Zhang H Y. Corrosion mechanisms of reclaimed water pipes under the synergistic effect of disinfectants and microorganisms [D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2017.

[15] 文　刚,王静怡,黄廷林,等.流式细胞仪在水处理中的应用现状与展望 [J]. 中国给水排水, 2014,30(18):58−62.
Wen G, Wang J Y, Huang T L, et al. Application of flow cytometer to water treatment: status and perspectives [J]. China Water & Wastewater, 2014,30(18):58−62.

[16] Zhu Y, Wang H B, Li X X, et al. Characterization of biofilm and corrosion of cast iron pipes in drinking water distribution system with UV/Cl_2 disinfection [J]. Water Research, 2014,60:174−181.

[17] 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.

[18] 孙海洋,杨根兰,蒋文杰,等.测定红层砂岩亚铁含量的邻菲啰啉分光光度法标准化研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2024,43(6):1229−1238.
Sun H Y, Yang G L, Jiang W J, et al. A study on the standardization of phenanthroline spectrophotometry for thedetermination of ferrous iron content in red layered sandstone [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2024,43(6):1229−1238.

[19] 毛小林.水性防腐涂层的制备及其耐腐蚀性能研究 [D]. 兰州:西北师范大学, 2018.

Mao X L. Preparation and corrosion resistance of waterborne anticorrosive coatings [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2018.

[20] Zhang G, Li B, Liu J, et al. The bacterial community significantly promotes cast iron corrosion in reclaimed wastewater distribution systems [J]. Microbiome, 2018,6(1):222.

[21] Zhang H Y, Tian Y M, Kang M X, et al. Effects of chlorination/chlorine dioxide disinfection on biofilm bacterial community and corrosion process in a reclaimed water distribution system [J]. Chemosphere, 2019,215:62-73.

[22] Lee W S, Aziz H A, Tajarudin H A. A recent development on iron-oxidising bacteria (IOB) applications in water and wastewater treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2022,49:103109.

[23] 胡家元,曹顺安,谢建丽.锈层对海水淡化一级反渗透产水中碳钢腐蚀行为的影响 [J]. 物理化学学报, 2012,28(5):1153-1162.
Hu J Y, Cao S A, Xie J L. Effect of rust layer on the corrosion behavior of carbon steel in reverse osmosis product water [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2012,28(5):1153-1162.

[24] Duan L F, Jia S S, Wang T H, et al. Synthesis and characterization of hollow Fe_2O_3 submicrospheres by a simple solvothermal synthesis [J]. Metals and Materials International, 2011,17(5):801-804.

[25] Xu N, Yan H, Jiao X, et al. Effect of OH^- concentration on Fe_2O_3 nanoparticle morphologies supported by first principle calculation [J]. Journal of Crystal Growth, 2020,547:125780.

[26] 范明洲,张 卉,王 龙,等.富里酸、硫酸盐与碱度耦合影响下的给水管网铁释放及管垢铁形态 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):168-177.
Fan M Z, Zhang H, Wang L, et al. Iron release and iron form of pipe scale in water distribution system under the coupling influence of fulvic acid, sulfate and alkalinity [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):168-177.

[27] 都有为,李正宇,陆怀先,等.FeOOH 生成条件的研究(Ⅰ) [J]. 物理学报, 1979,(5):705-711.
Du Y W, Li Z Y, Lu H X, et al. A study on growth condition of FeOOH(Ⅰ) [J]. Acta Physica Sinica, 1979,(5):705-711.

[28] Nguyen T, Montemor M F. γ-FeOOH and amorphous Ni-Mn hydroxide on carbon nanofoam paper electrodes for hybrid supercapacitors [J]. Joutnal of Materials Chemistry A, 2018,6(6):2612-2624.

[29] Yang T, Liu Y G, Huang Z H, et al. Porous peony-like α-Fe_2O_3 hierarchical micro/nanostructures: synthesis, characterization and its lithium storage properties [J]. Rsc Advances, 2014,4(78):41578-41583.

[30] Yun J, Yu R, Park S, et al. Tunable red-yellow coloration of β-FeOOH pigments by coating and controlling morphology [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2017,17(5):3424-3429.

[31] Amani-Ghadim A R, Alizadeh S, Khodam F, et al. Synthesis of rod-like α-FeOOH nanoparticles and its photocatalytic activity in degradation of an azo dye: Empirical kinetic model development [J]. Journal of Molecular Catalysis A-Chemical, 2015,408:60-68.

[32] 王 龙,张 卉,张 珊,等.流速、pH 值、硫酸根和碱度耦合变化对管网铁释放的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):124-131.
Wang L, Zhang H, Zhang S, et al. Coupling effects of flow rate, pH value, sulfate, and alkalinity on iron release from drinking water distribution systems [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):124-131.

[33] 黄 涛.耐候钢在南海海洋大气环境下的腐蚀行为研究 [D]. 北京:钢铁研究总院, 2018.
Huang T. Research on corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere of the South China sea [D]. Beijing: CISRI Advanced Steel Materials Division, 2018.

[34] Liu H X, Huang F, Yuan W, et al. Essential role of element Si in corrosion resistance of a bridge steel in chloride atmosphere [J]. Corrosion Science, 2020,173:108758.

[35] 叶志阳,余仲达,尤静林,等.取向硅钢脱碳退火氧化层的物相检测方法研究 [J]. 上海金属, 2015,37(6):1-4.
Ye Z Y, Yu Z D, You J L, et al. Phase detecting research of oxide layer formed during decarburization annealing of grain oriented silicon steel [J]. Shanghai Metals, 2015,37(6):1-4.

[36] McBeth J M, Emerson D. In situ microbial community succession on mild steel in estuarine and marine environments: exploring the role of iron-oxidizing bacteria [J]. Frontiers in Microbiology, 2016,7:767.

[37] Vilmain J B, Courousse V, Biard P F, et al. Kinetic study of hydrogen sulfide absorption in aqueous chlorine solution [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2014,92(2):191-204.

作者简介：朱净昱(2002-),女,山西忻州人,西安建筑科技大学硕士研究生,主要从事给水管网水质安全保障研究.发表论文 2 篇.18536991394@163.com.