

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.05.008

给水管道中铁氧化细菌生长特性优化及腐蚀研究

张 卉¹, 张 洁¹, 苗梓怡¹, 刘沙沙², 刘 卓¹, 卢金锁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. 常州市建筑科学研究院集团股份有限公司, 江苏 常州 213000)

摘 要: 给水管网的腐蚀问题已经成为供水行业普遍关注的热点,其中微生物腐蚀是重要因素之一。结合一株实际给水管道的铁氧化细菌 LSS-1,研究了不同碳源、pH、C/N 值和温度对其生长的影响,确定了 LSS-1 的最优生长条件为:pH=7.28、C/N 值=5.32、温度=28.45 °C。这三个因素对 LSS-1 生长影响的排序为:pH>C/N 值>温度。此外,利用总铁、二价铁、腐蚀速率和腐蚀产物特征,对 LSS-1 的腐蚀过程进行了定量分析。结果发现,总铁和二价铁浓度均呈现先升高后降低的趋势,且在 16 d 时达到最大值,分别为 12.56 和 0.31 mg/L;腐蚀速率在第 10 天达到最大值 0.73 mm/a,在第 30 天时达到最小值 0.21 mm/a。

关键词: 给水管网; 铁氧化细菌; 腐蚀; 铁释放

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)05-0058-07

Optimization of Growth Characteristics and Corrosion Behavior of an Iron-oxidizing Bacterium in Water Supply Pipelines

ZHANG Hui¹, ZHANG Jie¹, MIAO Zi-yi¹, LIU Sha-sha², LIU Zhuo¹, LU Jin-suo¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Changzhou Building Research Institute Group Co. Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: The corrosion of water supply networks has emerged as a critical concern within the water supply industry, with microbial-induced corrosion being a significant contributing factor. In conjunction with the iron-oxidizing bacterium LSS-1 isolated from water supply pipelines, this study investigated the impact of carbon sources, pH, C/N ratio, and temperature on its growth. The optimal growth conditions for LSS-1 were identified as pH of 7.28, C/N ratio of 5.32, and temperature of 28.45 °C. The relative influence of these three factors on LSS-1 growth in descending order was pH, C/N ratio and temperature. Furthermore, the corrosion process of LSS-1 was systematically evaluated through quantitative analysis of total iron concentration, ferrous iron concentration, corrosion rate, and characteristics of corrosion products. The concentrations of total iron and ferrous iron initially increased and subsequently decreased, reaching their peak values on 16th day at 12.56 mg/L and 0.31 mg/L, respectively. The corrosion rate peaked at 0.73 mm/a on 10th day and reached its minimum value of 0.21 mm/a on 30th day.

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2021JZ-50); 陕西省教育厅青年创新团队建设科研计划项目(21JP065)
通信作者: 卢金锁 E-mail: lujinsuo@xauat.edu.cn

Key words: water supply pipeline; iron-oxidizing bacterium; corrosion; iron release

给水管网系统是城市重要的基础设施,主要承担安全、可靠输送自来水的任务。然而,自来水在输送过程中会与管道发生一系列物理、化学和微生物反应,从而导致浊度升高、铁释放和微生物再生等问题,造成饮用水二次污染^[1-2]。管道腐蚀被认为是饮用水二次污染和“黄水”发生的根本原因^[3-4]。目前,给水管网腐蚀已经成为供水行业研究的热点问题。

微生物是影响给水管网腐蚀的重要因素之一。^[5-6]目前,已知的与给水管网腐蚀有关的微生物主要包括铁氧化细菌(IOB)、铁还原细菌(IRB)、硫酸盐还原菌(SRB)、硫氧化细菌(SOB)、产酸菌(APB)、丝裂菌(NFB)等^[7]。其中,IOB是给水管网中较常见的腐蚀性细菌,它们能够将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ,并将同时氧气还原为 OH^- ^[8]。不动杆菌是一种较为常见的IOB,广泛存在于给水管网系统中。研究发现^[9-12],比利时法兰德斯市自来水中的不动杆菌相对丰度高达47.5%,我国南方某镇自来水中不动杆菌的占比达到了33.26%,不动杆菌具有高效的铁转移能力,能够促进管网腐蚀和铁释放,导致“黄水”现象发生。

目前,关于实际给水管网中铁氧化细菌的研究有限,且针对铁氧化细菌的腐蚀特性缺乏定量分析。因此,笔者以一株不动杆菌(LSS-1)为代表性IOB,研究了碳源种类、pH、C/N值和温度对该细菌生长的影响,确定了LSS-1的最优生长条件,并在此基础上,结合总铁、二价铁、腐蚀速率和腐蚀产物特征,对LSS-1的腐蚀过程进行了定量分析,旨在为给水管网腐蚀与二次污染控制研究提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 细菌来源和培养基

1.1.1 细菌的富集、分离与纯化

通过对实际给水铸铁管管垢上的生物膜进行富集、分离和纯化得到实验所用菌株。操作流程:首先刮取少量管垢放入富集培养基(LB)中,然后放入培养箱振荡48 h(转速为150 r/min,温度为30℃);随后将LB培养基中的菌液经稀释、涂布至铁氧化细菌固体培养基,放入恒温培养箱中5 d(温度为30℃)。培养完成后,挑取培养基上长势较好

的菌落,多次划线纯化得到单一菌株。提取菌株DNA进行测序,并经核酸序列数据库对比获得近缘物种信息,发现该菌株与琼氏不动杆菌(*Acinetobacter junii*)的同源性为98%,确定该菌株为琼氏不动杆菌,将其命名为LSS-1,其系统发育树如图1所示。

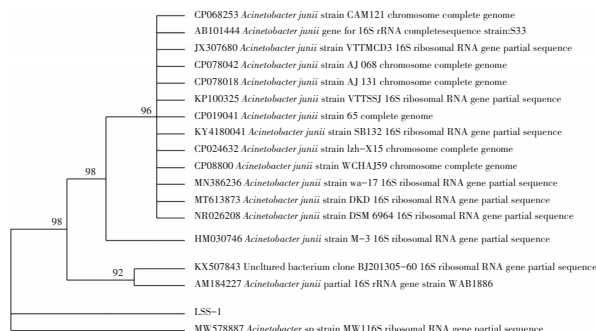


图1 铁氧化细菌LSS-1系统发育树

Fig.1 Phylogenetic tree of strain LSS-1

1.1.2 培养基成分

采用的培养基包括LB培养基和铁氧化细菌培养基。LB培养基:10 g/L的NaCl、10 g/L的胰蛋白胍、5 g/L的酵母膏、pH为7.2±0.2;铁氧化细菌培养基:0.5 g/L的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、0.5 g/L的 NaNO_3 、0.5 g/L的 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、0.5 g/L的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.5 g/L的 CaCl_2 、10 g/L的柠檬酸铁铵、pH为7.0±0.2。除上述成分外,固体培养基中还加入了16 g/L的琼脂粉。所有培养基在使用前均于121℃下灭菌30 min。

1.2 实验试剂和材料

实验所用试剂主要有乙酸钠、丁二酸钠、葡萄糖、柠檬酸钠、盐酸和氢氧化钠,且均为分析纯。采用的铸铁块尺寸为27 mm×55 mm×5 mm,其元素组分中C含量为3.58%、Si含量为2.26%、Mn含量为0.81%、P含量为0.086%、S含量为0.032%、Fe含量为93.232%。实验用水为实验室自来水,灭菌前溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、pH、电导率、总铁、 Fe^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、硬度和碱度分别为7~9.7 mg/L、140~400 mV、7.34~7.82、70~270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、0.02~0.28 mg/L、0~0.005 mg/L、10~20 mg/L、15~30 mg/L、60~72 mg/L(以 CaCO_3 计)、70~74 mg/L(以 CaCO_3 计)。灭菌后,DO和ORP分别为3.97~7.11 mg/L和85.7~265.4 mV,其他参数与灭菌前相同。

1.3 生长特性及优化实验

为探究 LSS-1 菌株的生长特性,对不同条件下菌株的 OD_{600} 进行测量。实验分别调节培养基的碳源种类(乙酸钠、丁二酸钠、葡萄糖和柠檬酸钠)、pH (以柠檬酸钠为唯一碳源,控制 pH 分别为 5、6、7、8 和 9)、C/N 值(以柠檬酸钠为唯一碳源,控制 C/N 值分别为 2、4、5、6 和 8)和温度(以柠檬酸钠为唯一碳源,控制温度分别为 10、20、30 和 40 $^{\circ}\text{C}$),并放入振荡培养箱中培养。灭菌后用 5%(体积分数)的 LSS-1 菌株进行接种培养,定时取样并测定样品的 OD_{600} 值,得出不同因素下细菌 LSS-1 的生长特性曲线。

采用 Design-Expert 12 建立响应曲面模型,分析 pH、C/N 值和温度对 LSS-1 生长特性的影响,以期找到其最佳生长条件。实验设置三因素三水平(pH: 5、7、9, C/N: 2、5、8, 温度: 20、30、40 $^{\circ}\text{C}$),具体参数见表 1。

表 1 响应曲面实验设计

Tab.1 Design of response surface experiment

序号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH	C/N 值
1	40	7	8
2	40	9	5
3	30	7	5
4	30	7	5
5	20	7	8
6	40	7	2
7	30	5	2
8	30	9	8
9	30	5	8
10	30	9	2
11	30	7	5
12	30	7	5
13	30	7	5
14	20	7	2
15	20	9	5
16	20	5	5
17	40	5	5

1.4 腐蚀实验

设置两组实验,分别为空白对照组和加菌实验组,将打磨处理后的铸铁片垂直淹没于 500 mL 的广口瓶中,每个瓶中放置两个铸铁片。将广口瓶置于磁力搅拌器上,以模拟真实管道中的水体流动状况。实验过程中 2 d 换一次水,并测量溶液中总铁和 Fe^{2+} 浓度,持续 30 d。为了表征腐蚀产物并计算腐蚀速率,另外设计两组实验,每个广口瓶中放置 6

个铸铁片,实验条件同上,2 d 换一次水,分别在 10、20、30 d 取出反应器中的两个铸铁片,将其真空冷冻干燥,然后用消毒刀片轻轻刮去以收集腐蚀产物,计算腐蚀速率。此外,30 d 时采集的样品用于表征其物理化学特征。

1.5 分析项目及方法

采用邻菲罗啉分光光度法测量样品中的总铁及 Fe^{2+} 浓度,采用扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射仪(XRD)分析腐蚀产物微观形貌和晶体结构,采用失重法测量铸铁片的腐蚀速率。

2 结果与讨论

2.1 LSS-1 生长的影响因素

2.1.1 碳源

不同碳源条件下 LSS-1 菌株的生长曲线如图 2 所示。可以看出,不同碳源条件下 LSS-1 菌株的生长曲线均呈现先升高后降低的趋势,并且 OD_{600} 均在 80 h 左右达到最大值。当采用柠檬酸钠为单一碳源时, LSS-1 生长得最好, OD_{600} 值最高达到 0.86,说明柠檬酸钠更容易被 LSS-1 吸收利用。其他碳源对 LSS-1 菌株生长的影响效果排序为:丁二酸钠>乙酸钠>葡萄糖,其 OD_{600} 最高值分别为 0.79、0.66 和 0.36。

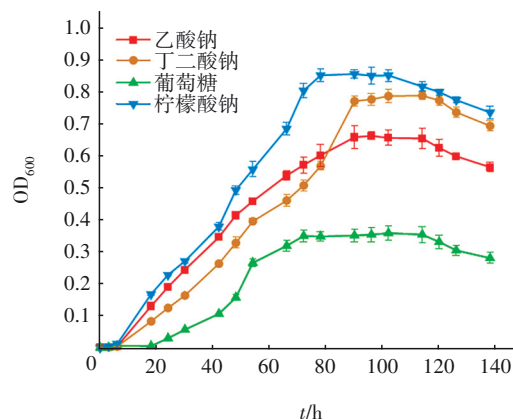


图 2 不同碳源条件下 LSS-1 菌株的生长曲线

Fig.2 Growth curve of LSS-1 under different carbon sources

2.1.2 pH

不同 pH 条件下 LSS-1 菌株的生长曲线如图 3 所示。可以看出,不同 pH 条件下 LSS-1 菌株 OD_{600} 的最大值排序为: pH=7>pH=8>pH=6>pH=9>pH=5。当 pH=5 时, LSS-1 的 OD_{600} 值为 0.005~0.007,说明 LSS-1 在低 pH 条件下不容易生长;当 pH 为 6~8 时,

LSS-1 的生长情况相差不大, OD_{600} 最大值均超过了 0.9, 说明 LSS-1 在中性条件下生长较好, 一般铁氧化细菌在 pH 为 5~8 下生长, 这与本研究结果一致。

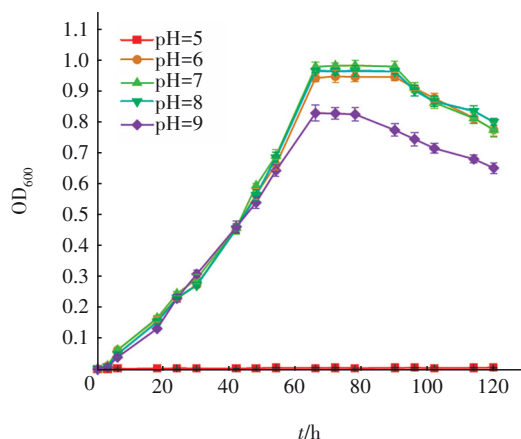


图 3 不同 pH 条件下 LSS-1 菌株的生长曲线

Fig.3 Growth curve of LSS-1 under different pH

2.1.3 C/N 值

不同 C/N 值条件下 LSS-1 菌株的生长曲线结果表明, 当 C/N 值分别为 2、4、5、6 和 8 时, LSS-1 菌株的 OD_{600} 值均在 72 h 左右达到最大, 分别为 0.81、0.83、0.96、0.79 和 0.81。可见, 不同 C/N 值条件下 LSS-1 的生长情况差异不大, 说明 LSS-1 对 C/N 值的适应范围较广。

2.1.4 温度

不同温度条件下 LSS-1 菌株的生长曲线如图 4 所示。

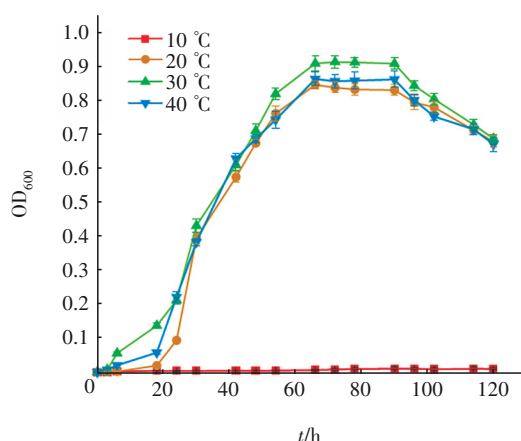


图 4 不同温度条件下 LSS-1 菌株的生长曲线

Fig.4 Growth curves of LSS-1 under different temperatures

从图 4 可以看出, LSS-1 菌株在 30 °C 时生长得最好, OD_{600} 最大值为 0.916。当温度为 10 °C 时,

LSS-1 的 OD_{600} 均值为 0.008, 说明此条件不利于 LSS-1 生长。当温度为 40 和 20 °C 时, LSS-1 的 OD_{600} 最大值分别为 0.866、0.849, 说明 LSS-1 的适应温度范围较广, 且具有较好的耐高温能力, 这可能是由于 LSS-1 菌株体内含有耐高温的酶。

2.2 LSS-1 生长条件优化

采用 Box-Behnken 设计的响应曲面分析了 pH、C/N 值和温度 3 个因素两两交互作用下对 LSS-1 生长的影响, 得出的模型拟合方程见式(1)。

$$Y = 0.86 - 0.0338A + 0.1085B + 0.0855C - 0.0753AB - 0.0438AC - 0.0142BC - 0.1584A^2 - 0.3784B^2 - 0.1184C^2 \quad (1)$$

式中: A 代表温度; B 代表 pH; C 代表 C/N; Y 代表 OD_{600} 。

表 2 给出了模型响应曲面相应的 p 值、 F 值和回归系数。其中, p 值表示模型出现错误的可能性, 其值越小, 说明模型准确度越高。该模型的 p 值为 0.000 1, 因此, 式(1)的模型具有较高的准确度和代表性。由表 2 可知, pH、C/N 值和温度均能显著影响 LSS-1 的生长特性。其中, 温度和 C/N 值的影响极为显著, pH 的影响非常显著。比较 3 个因素回归系数的绝对值发现, 对 LSS-1 生长影响的排序为: pH > C/N 值 > 温度。

表 2 Box-Behnken 模型实验设计方差分析

Tab.2 Variance analysis of Box-Behnken experimental design

项目	回归系数	F 值	p 值
A	-0.033 8	27.29	0.000 1
B	0.108 5	282.09	0.001 2
C	0.085 5	175.17	0.000 1
A^2	-0.158 4	67.84	0.162 8
B^2	-0.378 4	22.93	0.000 1
C^2	-0.118 4	2.43	0.000 1
AB	-0.075 3	316.34	0.000 1
AC	-0.043 8	1 805.60	0.000 1
BC	-0.014 2	176.07	0.000 1

注: 该模型的 F 值=340.44; p 值=0.000 1; 相关系数=0.997 7; 调整系数=0.994 8; 预测系数=0.963 5; $p < 0.001$ 表示极显著, $0.001 < p < 0.01$ 表示非常显著, $0.01 < p < 0.05$ 表示显著。

pH、C/N 值和温度对 LSS-1 菌株生长特性影响的三维响应曲面如图 5 所示。其中, 图 5(a) 显示了 C/N 值为 5 条件下, pH 和温度的影响。可以看出, 当温度从 20 °C 上升到 28.45 °C 时, LSS-1 的 OD_{600} 值逐

渐增大,但是超过 28.45 °C 后又逐渐减小。同时, pH 升高到 7.28 后, LSS-1 的 OD_{600} 值也随之减小。因此,最适温度和 pH 分别为 28.45 °C 和 7.28。由图 5(b) 可知,当 C/N 值逐渐升高到 5.32 时, OD_{600} 值达到最大。因此,结合式(1)可以确定 LSS-1 菌株的最佳生长条件如下: pH=7.28、C/N 值=5.32、温度=28.45 °C,相应的 OD_{600} 值为 0.88。

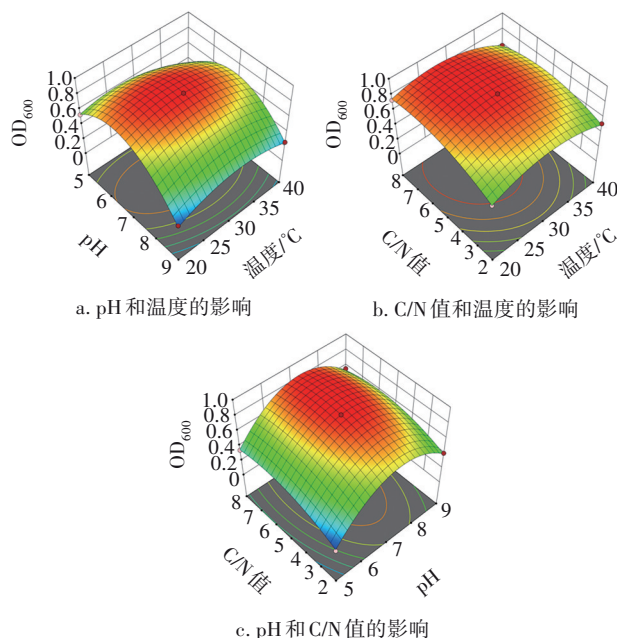


图5 LSS-1 菌株生长特性响应曲面

Fig.5 Response surfaces of LSS-1 growth characteristics

2.3 腐蚀产物分析

2.3.1 腐蚀产物微观分析

图6为 LSS-1 作用下腐蚀产物的 SEM 照片。

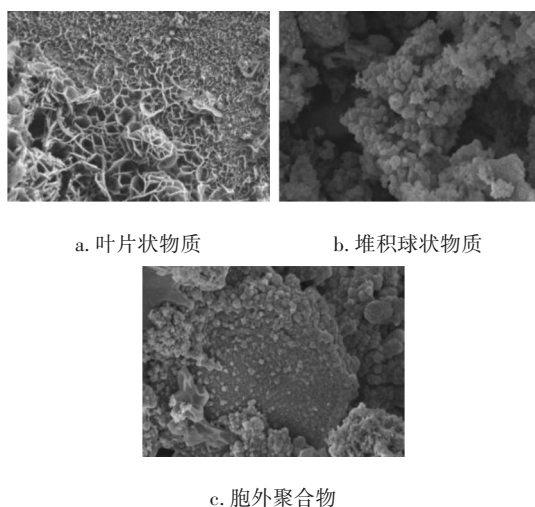


图6 LSS-1 作用下腐蚀产物的 SEM 照片

Fig.6 SEM photos of corrosion products under action of LSS-1

腐蚀产物中存在叶片状和单个堆积球状物质, 见图 6(a) 和 (b), 其可能是针铁矿(α -FeOOH)和磁铁矿(Fe_3O_4)^[13]。此外,在图 6(c)中还可以观察到腐蚀产物表面包裹的有机物,可能是细菌产生的胞外聚合物。

2.3.2 腐蚀产物的化学组成

图 7 为 LSS-1 菌株腐蚀产物的 XRD 图谱。可知,腐蚀产物主要有 α -FeOOH、纤铁矿(γ -FeOOH)、赤铁矿(Fe_2O_3)和 Fe_3O_4 , 其产物成分与相关研究获得的结果一致^[13-15]。相比于其他物质, Fe_3O_4 的出峰较多,且在 2θ 为 35.56° 时峰最强,说明 Fe_3O_4 含量较高。由于 Fe_3O_4 具有热力学稳定性,当腐蚀产物中 Fe_3O_4 较高时,会使得腐蚀产物较致密,从而对进一步腐蚀起到抑制作用^[16-17]。

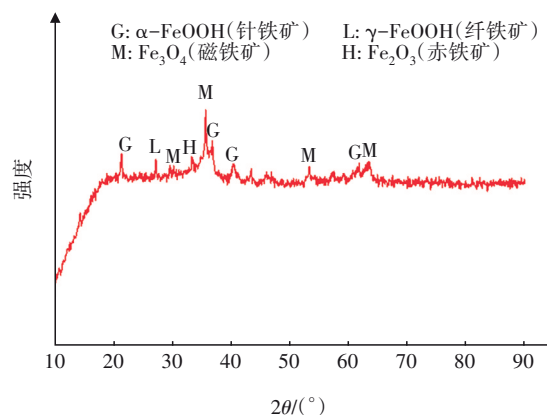


图7 LSS-1 菌株腐蚀产物的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of corrosion products with LSS-1

2.4 总铁和 Fe^{2+} 浓度的变化

图 8 为 LSS-1 和无菌水作用下总铁和 Fe^{2+} 浓度的变化。

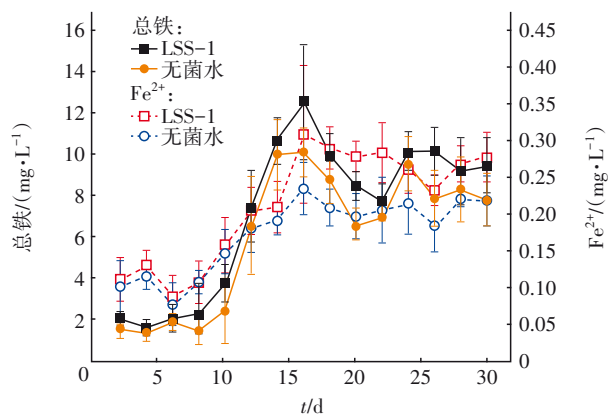
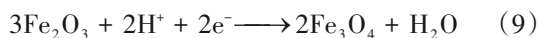
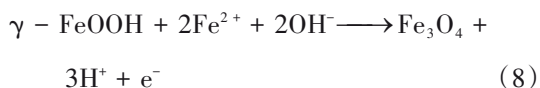
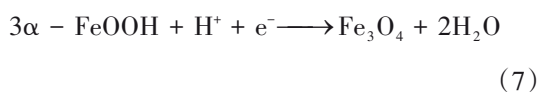
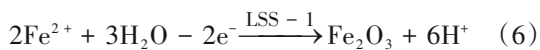
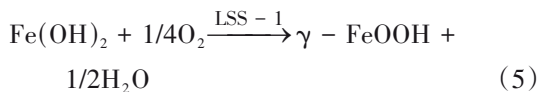
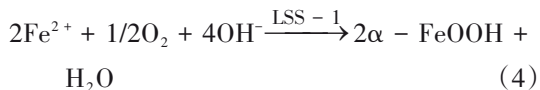
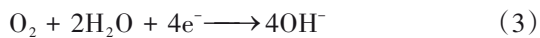


图8 LSS-1 和无菌水作用下总铁和 Fe^{2+} 浓度的变化

Fig.8 Variation of total iron and ferrous iron concentrations under the action of LSS-1 and sterile water

由图8可以看出,水中总铁和 Fe^{2+} 浓度均呈现先升高后降低的趋势,16 d时分别达到最大值12.56 mg/L和0.31 mg/L。此外,在整个腐蚀过程中,LSS-1的加入使得总铁和 Fe^{2+} 浓度均高于无菌水,因此,LSS-1能够促进腐蚀的发生。分析机理,这是由于原子态的铁首先失去电子变为 Fe^{2+} ,此时氧气作为电子受体被还原为 OH^- ,随后 Fe^{2+} 在LSS-1的作用下被氧化为 Fe^{3+} ,进而生成 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和 Fe_2O_3 等腐蚀产物,见式(2)~(6)^[7]。由于 $\alpha\text{-FeOOH}$ 具有多孔、松散等特性,较易释放到水中,因此,在腐蚀实验的前16 d,总铁和 Fe^{2+} 浓度均较高。但是,随着反应的进行,生成的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 和不稳定的 $\gamma\text{-FeOOH}$ 及 Fe_2O_3 会逐渐转变为性质更加稳定的 Fe_3O_4 ,见式(7)~(9),使得腐蚀反应受到一定的抑制作用,从而降低了总铁和 Fe^{2+} 浓度^[7,18]。此外,LSS-1产生的胞外聚合物也在一定程度上抑制了腐蚀的发生,使得总铁和 Fe^{2+} 含量逐渐减少。



2.5 腐蚀速率

LSS-1和无菌水作用下腐蚀速率的变化如图9所示。可以看出,在LSS-1和无菌水作用下腐蚀速率均逐渐下降,且LSS-1作用下的腐蚀速率高于无菌水,进一步说明了LSS-1菌株对腐蚀的促进作用。当存在LSS-1时,10 d时的腐蚀速率达到最大值,为0.73 mm/a;30 d时的腐蚀速率最低,为0.21 mm/a。两种条件下腐蚀速率的差距逐渐减小,其原因可能来自两个方面,一是腐蚀产物中 Fe_3O_4 含量的增加,

二是LSS-1产生的胞外聚合物不断积累^[7]。

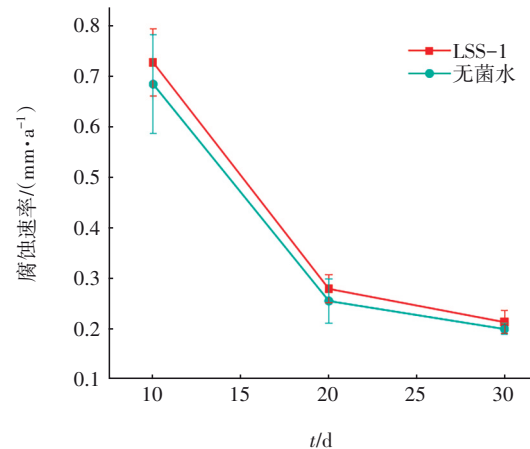


图9 LSS-1和无菌水作用下腐蚀速率的变化

Fig.9 Variation of corrosion rate under the action of LSS-1 and sterile water

3 结论

① LSS-1菌株在柠檬酸钠作为单一碳源、C/N值=5、pH=7和温度为40℃时生长较好,最优生长条件如下:pH为7.28、C/N值为5.32和温度为28.45℃,在此条件下 OD_{600} 值为0.88。pH、C/N值和温度均对LSS-1的生长产生显著影响,其影响排序为:pH>C/N值>温度。

② LSS-1作用下的腐蚀产物呈叶片状和堆积球状,成分包括 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 。

③ 在LSS-1存在的条件下,总铁和 Fe^{2+} 浓度均呈现先升高后降低的趋势。总铁和 Fe^{2+} 浓度均在16 d时达到最大值,分别为12.56和0.31 mg/L。

④ 在LSS-1作用下,腐蚀速率随着时间的增加逐渐降低,其原因可能是腐蚀产物中 Fe_3O_4 含量的增加和胞外聚合物的积累。

参考文献:

- [1] WANG Y M, ZHU G C. Evaluating the corrosiveness in drinking water distribution system in Yancheng City[J]. Desalination and Water Treatment, 2021, 242: 250-259.
- [2] ZYWIEC J, TCHÓRZEWSKA-CIESLAK B, PAPCIAK D, et al. Changes of microbiological parameters of water in domestic distribution system in terms of water supply safety [J]. Desalination and Water Treatment, 2021, 226: 37-51.
- [3] MESDAGHINIA A, NODEHI R N, NASSERI S, et al.

- Potential for iron release in drinking water distribution system: a case study of Hamedan City, Iran [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57 (31): 14461-14472.
- [4] TONG H Y, ZHAO P, HUANG C K, *et al.* Development of iron release, turbidity, and dissolved silica integrated models for desalinated water in drinking water distribution systems [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(1): 398-507.
- [5] ZHONG H Y, SHI Z M, JIANG G M, *et al.* Decreasing microbially influenced metal corrosion using free nitrous acid in a simulated water injection system [J]. *Water Research*, 2020, 172: 115470.
- [6] 张文毓. 海洋微生物腐蚀研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(1): 8-12.
- ZHANG Wenyu. Advances in the study of microbiologically influenced corrosion in marine environment [J]. *Total Corrosion Control*, 2017, 31 (1): 8-12 (in Chinese).
- [7] SUN H F, SHI B Y, LYTLE D A, *et al.* Formation and release behavior of iron corrosion products under the influence of bacterial communities in a simulated water distribution system [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, 16(3): 576-585.
- [8] LIU H W, GU Y T, ZHANG G A, *et al.* Corrosion inhibition of carbon steel in CO₂-containing oilfield produced water in the presence of iron-oxidizing bacteria and inhibitors [J]. *Corrosion Science*, 2016, 105: 149-160.
- [9] 景明, 李继影. 南方某镇自来水中微生物多样性研究 [J]. 环境科技, 2021, 34(3): 19-23.
- JING Ming, LI Jiying. Study on microbial diversity in tap water of a town in the south of China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 34 (3): 19-23 (in Chinese).
- [10] VAN ASSCHE A, CRAUWELS S, DE BRABANTER J. *et al.* Characterization of the bacterial community composition in water of drinking water production and distribution systems in Flanders, Belgium [J]. *MicrobiologyOpen*, 2019, 8(5): 726.
- [11] GOMES I B, SIMOES M, SIMOES L C. The effects of sodium hypochlorite against selected drinking water-isolated bacteria in planktonic and sessile states [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 40-48.
- [12] GHOLIPOUR S, SHAMSIZADEH Z, GWENZI W, *et al.* The bacterial biofilm resistome in drinking water distribution systems: a systematic review [J]. *Chemosphere*, 2023, 329: 138642.
- [13] ZHANG H, LIU S S, CHANG S, *et al.* Corrosion inhibition of iron pipes in drinking water distribution systems by a nitrate-reducing bacterium with varied nitrate concentrations [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2022, 271: 16-26.
- [14] WANG H, HU C, HU X, *et al.* Effects of disinfectant and biofilm on the corrosion of cast iron pipes in a reclaimed water distribution system [J]. *Water Research*, 2012, 46 (4): 1070-1078.
- [15] EMERSON D. The role of iron-oxidizing bacteria in biocorrosion: a review [J]. *Biofouling*, 2018, 34(9/10): 989-1000.
- [16] 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 (11): 115742.
- [17] KETRANE R, YAHIAOUI C. Scale precipitation on HDPE pipe by degassing of CO₂ dissolved in water [J]. *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 2021, 70(5/8): 1204-1216.
- [18] SUN H F, SHI B Y, YANG F, *et al.* Effects of sulfate on heavy metal release from iron corrosion scales in drinking water distribution system [J]. *Water Research*, 2017, 114: 69-77.

作者简介: 张卉(1980-), 女, 陕西咸阳人, 博士, 副教授, 研究方向为城市饮用水安全输配技术。

E-mail: zhanghui@xauat.edu.cn

收稿日期: 2023-11-09

修回日期: 2024-01-23

(编辑: 任莹莹)