

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.06.014

微生物反应器硫酸盐还原影响因素试验

孙晓宇^{1,2}, 李泽兵^{1,2}, 王淼^{1,2}, 陈诗怡^{1,2}, 孙占学^{1,2},
袁志华^{1,2}, 郑增军^{1,2}, 龚慧纯^{1,2}

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013;
2. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 南昌 330013)

摘要: 由于酸法地浸生产常年注入硫酸导致采区及其周边地下水形成硫酸盐污染。为解决此问题, 采用硫酸盐还原菌培养液模拟矿山废水, 利用生物反应器进行循环批次试验和连续运行试验, 探讨不同种类填料、循环上升流速、水力停留时间(HRT)、进水 SO_4^{2-} 浓度、COD/ SO_4^{2-} 值等对硫酸盐还原效果的影响。试验结果显示, 最佳运行条件为: 海绵+K3 混合填料、HRT=12 h、进水 SO_4^{2-} 浓度约 0.8 g/L、COD/ SO_4^{2-} =2; 长期运行结果表明, 30 ℃ 时, 连续出水 SO_4^{2-} 浓度约 0.10 g/L, SO_4^{2-} 去除率达到 87.9%, 达到地下水Ⅳ类水及以上标准。

关键词: 硫酸盐废水; 硫酸盐还原菌; 生物反应器; 影响因素

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2022)06-0084-07

Experiment on Influencing Factors of Sulfate Reduction in Microbial Reactors

SUN Xiao-yu^{1,2}, LI Ze-bing^{1,2}, WANG Miao^{1,2}, CHEN Shi-yi^{1,2}, SUN Zhan-xue^{1,2},
YUAN Zhi-hua^{1,2}, ZHENG Zeng-jun^{1,2}, GONG Hui-chun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. School of Water Resource and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Sulfate pollution to the mining area and its surrounding groundwater was caused by perennial injection of sulfuric acid during acid in-situ leaching. To solve the problem, sulfate-reducing bacteria culture solution was used to simulate mine wastewater, and bioreactor was used to conduct cyclic batch tests and continuous operation tests. Effects of different fillers, circulating upward flow rate, hydraulic retention time (HRT), influent SO_4^{2-} concentration, and COD/ SO_4^{2-} value on sulfate reduction were discussed. The test results show that the optimum operating conditions include sponge+K3 mixed filler, HRT=12 h, influent SO_4^{2-} concentration of about 0.8 g/L, and COD/ SO_4^{2-} =2. The long-term operation results show that at 30 ℃, the effluent SO_4^{2-} concentration can reach 0.10 g/L, and removal rate of SO_4^{2-} is 87.9%, which meet the standard of groundwater class Ⅳ and above.

Key words: sulfate wastewater; sulfate reducing bacteria; bioreactor; influencing factors

收稿日期: 2022-03-07

基金项目: 国防科技工业局核设施退役及放射性废物治理科研项目(G20210004); 国家自然科学基金资助项目(41772266)

作者简介: 孙晓宇(1997-), 男, 硕士研究生; 通信作者: 孙占学(1962-), 男, 教授, 博士生导师

我国北方地区砂岩铀矿酸法地浸开采已成为国内天然铀产品的主要来源^[1-2],但是,开采过程中注入大量硫酸也导致矿区及其周边地下水发生硫酸盐污染^[3],与开采前的背景值相比,地下水硫酸根浓度显著升高。以512铀矿床一批停采老采区为例,测得地下水中 SO_4^{2-} 浓度为7.18~22.80 g/L,最高超过地下水Ⅳ类水(≤ 0.35 g/L)标准65倍^[4]。因此,脱除地下水中的硫酸根成为了矿区退役治理的关键难点。

生物法脱除水体硫酸盐的本质是利用自然界硫循环反应原理。在厌氧条件下,硫酸盐还原菌(SRB)以有机物作为碳源和电子供体,以硫酸根等氧化态硫为电子受体,通过还原作用,以气体或沉淀的方式去除硫酸盐。目前,国内外研究表明,生物法脱硫主要受工艺参数和离子条件的限制。首先,适宜的工艺条件是SRB保持高活性的关键。在SRB理想温度30~35℃条件下,梁海^[4]利用上流式K3填料床开展了厌氧硫酸盐生物还原研究,研究结果表明,碳源、HRT、COD/ SO_4^{2-} 和硫酸盐负荷分别为葡萄糖、16 h、0.9和3 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)时,硫酸根去除率达到91.07%±1.39%,处理效果较好。但是,在实际矿山应用中,因多种因素限制,无法提供合适的温度等理想条件。其次,各类硫酸盐废水中的伴生离子浓度也将对SRB活性带来极大的限制。吴开轩等^[5]利用秸秆浸提液为进行碳源试验,说明了重金属浓度升高对体系 SO_4^{2-} 及重金属去除均有抑制作用。张杰等^[6]将对酸性矿山废水(AMD)与选矿废水(MPW)协同处理,Cu、Zn和Fe去除率达到96%以上,而硫酸根去除率仅为46.10%,并通过微生物群落分析表明,随着进水重金属浓度的升高,反应器内微生物的丰富度降低。可见前人对于硫酸盐废水生物修复的研究多着重于关注重金属的去除,针对硫酸盐还原效果为主要目标的研究较为缺乏。

为获取一种具有实际应用价值的硫酸盐还原反应器运行条件,本研究利用硫酸盐还原菌培养液模拟矿山废水,通过生物反应器进行批次试验和连续运行试验,探讨在不同填料种类、循环上升流速、水力停留时间、进水 SO_4^{2-} 浓度、COD/ SO_4^{2-} 值对硫酸盐还原效果的影响,并讨论其作用机制,为下一步修复酸法地浸采区硫酸盐污染的工业应用提供参考与依据。

1 材料与方法

1.1 SRB及培养液

试验所用菌源来自东华理工大学核资源与环境

国家重点实验室从新疆和内蒙古某铀矿驯化培养获得的SRB菌群,采用改进的Postgate C培养液^[7]扩大培养,主要成分: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1 g/L、 Na_2SO_4 0.5 g/L、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g/L、 NH_4Cl 1 g/L、 KH_2PO_4 0.5 g/L、 CaCl_2 0.1 g/L、70%乳酸钠 5 mL/L、酵母膏 0.5 g/L、抗坏血酸 0.1 g/L。

1.2 试验装置与材料

试验装置为有机玻璃制作的圆柱形反应器,内径10 cm,柱壁厚0.5 cm,柱高100 cm,在柱侧壁底部设一个进水口,距底部40 cm设一个取样口,距顶部10 cm处设置出水口。试验运行时液面高度为90 cm,有效容积为7 L。混合培养液从反应器底部进入,上部流出,蠕动泵提供水流动力。

反应器内填充物为(以堆积体积计)K3环状填料($\Phi 2.5$ cm×1 cm,简称K3填料)和改性聚氨酯泡沫填料(1.5 cm×1.5 cm×5 cm,简称海绵填料)。

1.3 试验内容

由于实验室获得的SRB菌液规模小且数量少,转移到反应器后需要加入培养液富集培养一段时间。液体逐渐变黑,同时散发出臭鸡蛋气味,说明硫酸盐还原菌大量繁殖^[8-10]。此时,液体中菌群密度较高,但培养液碳源不足且细菌产物积累,如果继续培养,细菌活性会受到抑制,细菌增殖速度会下降。故开始循环批次运行,自底部进新配的培养液,进量为反应器液体体积,进液完成后,使用蠕动泵使反应器内自下而上内循环运行,使细菌在填料上挂膜生长^[11],同时监测硫酸盐浓度变化。若反应器能在三天内将硫酸盐浓度降低到0.35 g/L以下,则达到试验目标,认为细菌挂膜完成,连续进液运行。循环批次和连续运行中具体研究变量条件如表1所示。

表1 批次试验控制条件

Table 1 Batch experimental control conditions			
序号	运行方式	研究变量	设置类型或梯度
1	循环批次	填料种类	海绵、K3、海绵+K3(1∶1)
2		循环上升流速/ (m·h ⁻¹)	0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5
3	连续进水	水力停留时间/ h	4、8、10、12、16、20、24
4		进水 SO ₄ ²⁻ 浓度/ (g·L ⁻¹)	0.4、0.8、1.2、1.6、2.0、2.4
5		COD/SO ₄ ²⁻ 值	1、2、3、4

1.4 测试方法

试验中pH、*Eh*值、DO值采用雷磁DZB-718-B便携式多参数分析仪测定,COD采用连华5B-3F化学需氧量快速测定仪测定, SO_4^{2-} 浓度使用Thermofisher

ICS-1100 离子色谱仪测定。

2 结果与讨论

2.1 不同种类填料对硫酸盐还原的影响

图1为在相同进水条件下不同填料反应器进水和出水 SO_4^{2-} 浓度变化,图2是不同填料反应器对应的 SO_4^{2-} 去除率,进行了3个批次重复试验。结果显示,海绵填料单批次 SO_4^{2-} 去除率为10%~20%,在三者中效果最差;K3 填料单批次 SO_4^{2-} 去除率效果较稳定,为20%左右;海绵+K3 混合填料效果较好, SO_4^{2-} 去除率可达30%以上。另外,对比3个重复批次试验结果可以看出, SO_4^{2-} 浓度的降低速率随运行次数推移逐渐增大。由于此次试验是在反应器完成扩大培养启动过程一个月后进行的,每个批次试验在完全相同的条件下上升的去除率说明了微生物反应器的 SO_4^{2-} 还原能力在逐渐提高,反映了硫酸盐还原菌的菌群密度正在逐渐增大,活性正在逐步升高。

填料是包括硫酸盐还原菌在内的菌群生长挂膜的场所,因此,不同填料的选择会直接影响细菌种群结构和附着密度,进而影响硫酸盐还原效果。由于填料形状、孔隙率、堆积密度不同,优势菌种和种群结构也相应发生变化。硫酸盐还原菌可能更容易在K3 环状填料上生长,海绵+K3 混合的结构可能更有利于硫酸盐还原相关的菌群挂膜生长,将海绵填料生长的菌群与 K3 填料生长菌群功能互补,发挥生物协同作用。

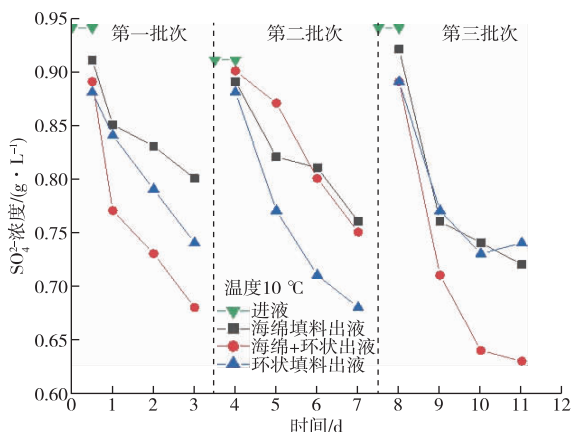


图1 不同填料条件下进水和出水 SO_4^{2-} 浓度

Fig. 1 Sulfate concentrations under different filling conditions

2.2 循环上升流速对硫酸盐还原的影响

图3为在相同混合填料和同一进水条件下,不

同循环上升流速(0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m/h)反应器进水和出水 SO_4^{2-} 浓度,图4和表2分别为对应的 SO_4^{2-} 去除率和去除速率,共进行了3个批次重复试验。20 °C,在循环上升流速为1.5 m/h条件下,进水 SO_4^{2-} 浓度0.63 g/L,经过反应器72 h 循环反应,最低可降至0.15 g/L,单批次平均 SO_4^{2-} 去除速率为0.16 g/(L·d),单批次 SO_4^{2-} 去除率可达70%以上。横向对比六个梯度循环上升流速条件下的 SO_4^{2-} 浓度变化,0 m/h 时降低速率最低,经72 h 循环,将进水 SO_4^{2-} 浓度由0.63 g/L降低至0.38 g/L,单批次平均 SO_4^{2-} 去除速率只有0.08 g/(L·d)。试验结果显示, SO_4^{2-} 去除效果最佳条件是循环上升流速1.5 m/h,而循环上升流速为0、1.0、2.0 m/h 时均较差。

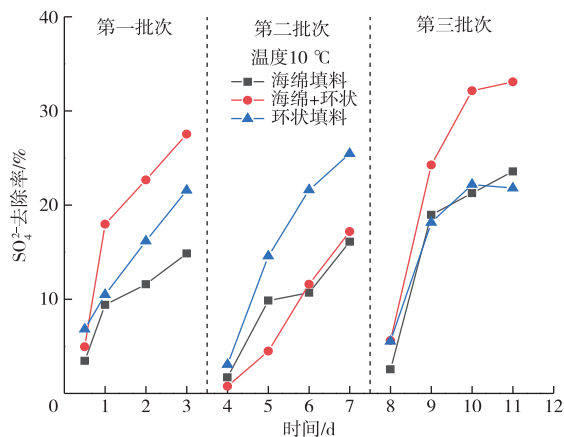


图2 不同填料的反应器 SO_4^{2-} 去除率

Fig. 2 SO_4^{2-} removal rates under different filling conditions

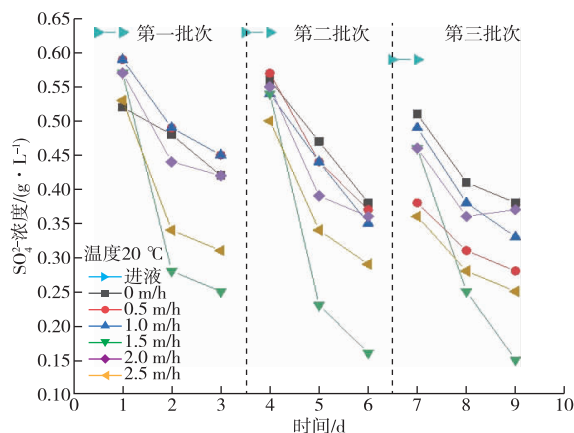


图3 不同循环上升流速条件下进水和出水 SO_4^{2-} 浓度

Fig. 3 Sulfate concentrations under different circulating rising flow rates

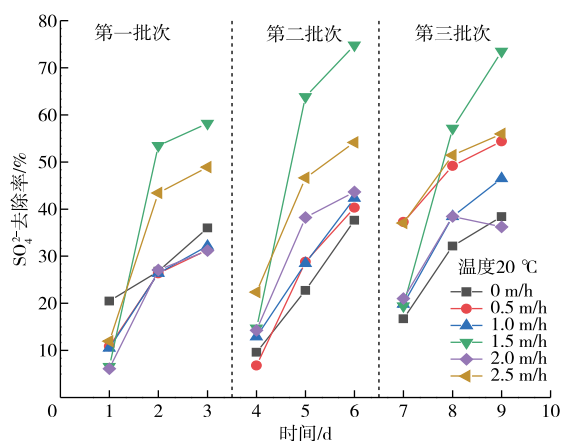


图 4 不同上升流速条件下 SO_4^{2-} 去除率

Fig. 4 SO_4^{2-} removal rates under different rising flow conditions

表 2 不同循环流速条件下单
批次平均 SO_4^{2-} 去除速率

Table 2 Single batch average SO_4^{2-} removal rates
under different circulating flow rates

批次	循环上升流速/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)					
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
1	0.08	0.07	0.07	0.12	0.06	0.10
2	0.08	0.08	0.09	0.16	0.09	0.12
3	0.08	0.11	0.09	0.14	0.07	0.11
平均值	0.08	0.09	0.08	0.14	0.07	0.11

循环上升流速决定了反应器内细菌与硫酸盐废水接触的时间长短。循环上升流速过慢或过快,反应器硫酸盐还原速率均会受到影响。流速过慢时,细菌还原所需碳源不足,反应产物堆积反过来抑制反应进行,使硫酸盐还原速率变小。对颗粒污泥而言,当上升流速过慢时,微生物分散生长,污泥絮体中丝状菌数量较多,结构较为松散,颗粒污泥形成周期较长或难以形成^[12-13]。上升流速过快时,在反应器启动初期菌群不能正常生长和吸附于载体上,可能会随水流动,造成菌群流失^[14]。上升流速越大,水力剪切力越大。水力剪切条件变化引起选择作用和选择压力不同,改变了反应器中微生物生存环境,制约系统物质循环和能量传递过程,影响反应器系统中优势微生物种群、数量及颗粒污泥结构^[15]。

2.3 水力停留时间对硫酸盐还原的影响

采用上述试验结果的最佳条件:海绵+K3 填料、连续进水 SO_4^{2-} 浓度 0.84 g/L,考察不同 HRT (4、8、10、12、16、20、24 h) 对 SO_4^{2-} 还原效果的影响,结果见图 5 和图 6。HRT=24 h 时,进水 SO_4^{2-}

可由 0.84 g/L 降至 0.05 g/L 以下,去除率为 95%。 SO_4^{2-} 去除率整体随 HRT 的增长而变大,即越长的水力停留时间硫酸盐还原越充分。横向对比各组 HRT 数据可以看出,当 $\text{HRT}=12\sim24\text{ h}$ 时,出水 SO_4^{2-} 浓度稳定降至 0.3 g/L 以下, SO_4^{2-} 去除率各组差别不大,均维持在 70% 以上。

水力停留时间与反应器进水流速有关,改变了细胞外硫酸盐负荷,HRT 越长,进水 SO_4^{2-} 负荷越低,越有利于硫酸盐还原菌与废水充分反应,则出水硫酸浓度则越低。但较长的水力停留时间意味着需要更大的反应器体积和更多的能源消耗,且水力停留时间过长会导致碳源不足和产物积累。考虑到高效和经济因素,本试验选取 $\text{HRT}=12\text{ h}$ 为最佳水力停留时间。

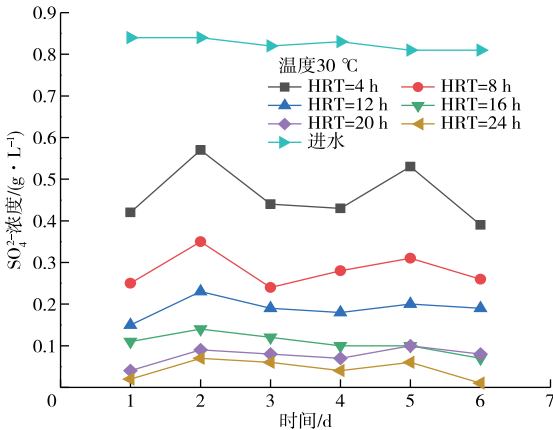


图 5 不同水力停留时间条件下
进水和出水 SO_4^{2-} 浓度

Fig. 5 Sulfate concentrations under different HRT conditions

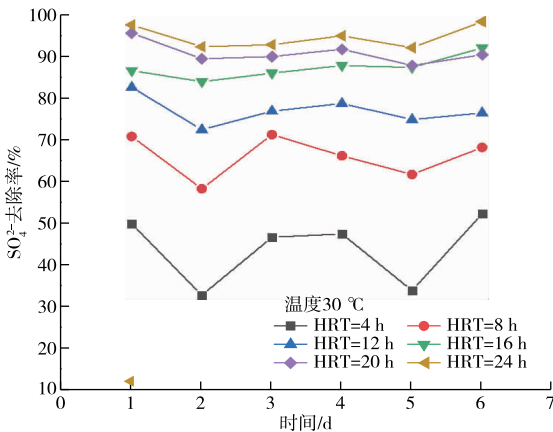


图 6 不同水力停留时间条件下 SO_4^{2-} 去除率

Fig. 6 SO_4^{2-} removal rates under different HRT conditions

2.4 进水 SO_4^{2-} 浓度对硫酸盐还原的影响

在温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、海绵+K3 填料、 $\text{HRT}=12\text{ h}$ 条件下,考察不同进水 SO_4^{2-} 浓度(0.4、0.8、1.2、1.6、2.0、2.4 g/L)对 SO_4^{2-} 还原效果的影响,结果见图7、图8和表3。随进水 SO_4^{2-} 浓度的增大, SO_4^{2-} 去除率逐渐减小。在地下水质量标准($\text{SO}_4^{2-} \leq 0.35\text{ g/L}$) IV类水限值下,进水 SO_4^{2-} 浓度控制在 0.8 g/L 左右还原效果较好。结合表3,进水 SO_4^{2-} 浓度分别为 1.2、1.6、2.0 g/L 时, SO_4^{2-} 还原速率分别达到 0.72、0.71、0.81 $\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d})$,高于其他浓度时的表现,说明反应器对于高负荷硫酸盐废水仍有较强适应性与处理能力。

进水 SO_4^{2-} 负荷是影响硫酸盐还原效果的主要因素之一^[16]。 SO_4^{2-} 负荷和还原产物 S^{2-} 、 HS^- 等对硫酸盐的去除有一定的平衡关系,也使 SO_4^{2-} 还原量的增加伴随着还原产物的增加,还原产物的积累会反向抑制 SO_4^{2-} 还原过程的进行。同时,考虑到反应器内存在与 SRB 竞争的菌群,当系统内的硫酸盐浓度较低时,SRB 电子受体变少,势必会增加与其他菌群的竞争,不利于 SRB 生长繁殖。

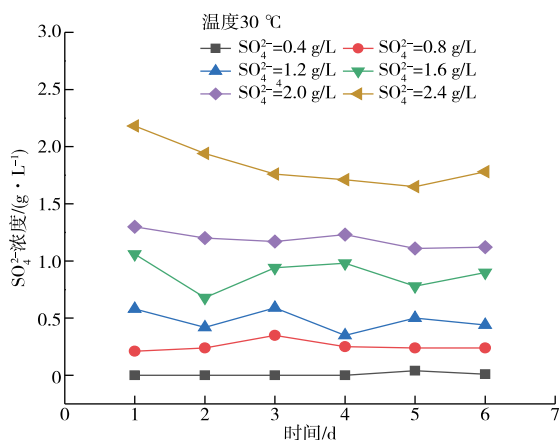


图7 不同进水 SO_4^{2-} 浓度条件下的出水 SO_4^{2-} 浓度

Fig. 7 Sulfate concentrations under different SO_4^{2-} loading conditions

2.5 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 值对硫酸盐还原的影响

在温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、海绵+K3 填料、 $\text{HRT}=12\text{ h}$ 条件下,保持进水 SO_4^{2-} 为 0.75 g/L,通过改变进水乳酸钠的添加量改变进水的 COD,从而改变 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 值,探究 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ (1、2、3、4)对 SO_4^{2-} 还原效果的影响,结果如图9和图10所示。进水 SO_4^{2-} 浓度为 0.75 g/L、在 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 值(C/S)分别为 1、2、3、4 时,出水 SO_4^{2-} 平均浓度分别为 0.44、0.36、0.39、0.46 g/L。 SO_4^{2-} 去除率与 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 值不是简单的线性关系,

而是在 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 2$ 时相对稳定在较高的水平, $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 3$ 时去除率次之, $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 4$ 时再次, $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 1$ 时 SO_4^{2-} 去除率不稳定,但普遍低于 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 2$ 时的表现。结果表明, $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 2$ 时可达到最佳硫酸盐还原效果。

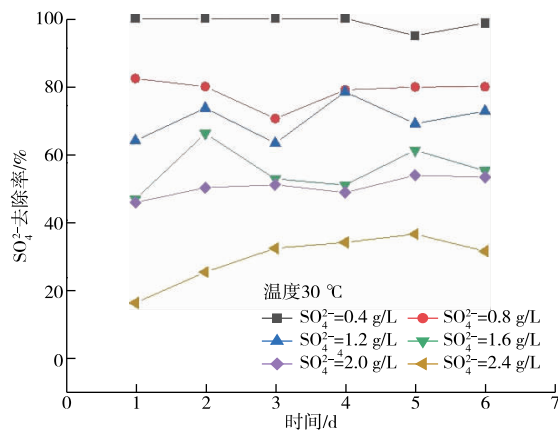


图8 不同进水 SO_4^{2-} 浓度下 SO_4^{2-} 去除率

Fig. 8 Sulfate removal rates under different SO_4^{2-} loading conditions

表3 不同进水 SO_4^{2-} 浓度条件下的 SO_4^{2-} 去除速率

Table 3 SO_4^{2-} removal rates under different sulfate loading conditions

时间/d	进水 SO_4^{2-} 浓度/ $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$					
	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4
1	0.40	0.59	0.62	0.54	0.70	0.22
2	0.40	0.56	0.78	0.92	0.80	0.46
3	0.40	0.45	0.61	0.66	0.83	0.64
4	0.40	0.55	0.85	0.62	0.77	0.69
5	0.36	0.56	0.70	0.82	0.89	0.75
6	0.39	0.56	0.76	0.70	0.88	0.62
平均值	0.39	0.55	0.72	0.71	0.81	0.56

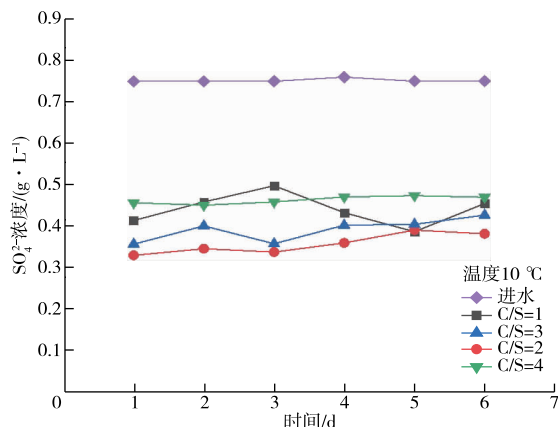


图9 不同进水 C/S 条件下的出水 SO_4^{2-} 浓度

Fig. 9 Sulfate concentrations under different C/S conditions

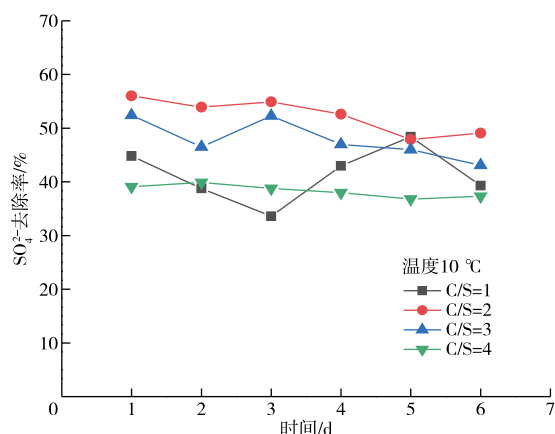
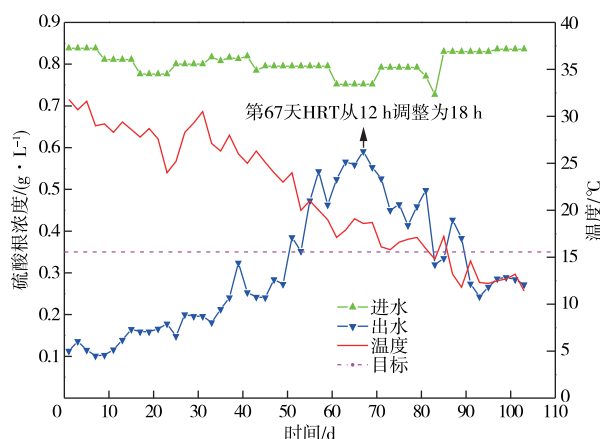
图 10 不同进水 C/S 条件下 SO_4^{2-} 去除率

Fig. 10 Sulfate removal rates under different C/S conditions

$\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 值是直接影响 SRB 异化硫酸盐还原反应进行所需电子供体与受体的因素,该比值大小决定了硫酸盐还原反应速率快慢。 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 值过高或过低都不利于硫酸盐还原。硫酸盐还原的 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 理论值为 0.67,但由于反应器内存在发酵、产甲烷等其他反应,实际的有机物消耗量远大于理论值,如试验结果中 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 1$ 时仍不稳定,且还原效果差于 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 2$ 。在较高的 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 值时,反应器内产甲烷菌的微生物反应更普遍^[17],SRB 在利用电子时优势较低。

2.6 长期连续运行 SO_4^{2-} 去除效果

试验得出硫酸盐还原反应器的最佳运行条件为:海绵+K3 混合填料、 $\text{HRT} = 12 \text{ h}$ 、进水 SO_4^{2-} 浓度 0.8 g/L 左右、 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 2$ 。为探究反应器长期运行的稳定性,按照以上最佳条件运行 100 天,出水 SO_4^{2-} 浓度变化如图 11 所示。进水 SO_4^{2-} 浓度在 0.8 g/L 左右,气温 $25 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,出水 SO_4^{2-} 浓度保持在 0.35 g/L 以下。其中在气温 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,出水 SO_4^{2-} 浓度可达到 0.10 g/L 左右, SO_4^{2-} 去除率达到 87.9% ,表现了反应器在适宜温度下优异的 SO_4^{2-} 处理性能。当温度逐渐下降,出水 SO_4^{2-} 浓度随之升高,温度降至 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,出水 SO_4^{2-} 浓度为 0.56 g/L ,去除率仅有 25.7% ,可见硫酸盐还原效果受温度影响很大。根据出水浓度变化,为保证达到去除目标,第 67 天将水力停留时间从 12 h 动态延长到 18 h ,出水 SO_4^{2-} 浓度逐渐降低,至第 83 天出水浓度为 0.32 g/L ,而后温度虽然降至 $15 \text{ }^\circ\text{C}$,出水 SO_4^{2-} 浓度仍稳定在 0.30 g/L 左右,反应器稳定运行,达到修复目标。

图 11 反应器最佳条件运行 100 天 SO_4^{2-} 去除情况Fig. 11 Removal of SO_4^{2-} in 100 days of operation under optimum conditions

3 结论

1) 批次运行试验阶段,海绵+K3 混合填料 SO_4^{2-} 去除率高于单一海绵填料和 K3 填料,循环上升流速 1.5 m/h 条件下 SO_4^{2-} 去除效果最好。

2) 连续运行试验阶段, SO_4^{2-} 去除率随水力停留时间 HRT 的增长而升高,最佳值为 12 h 。 SO_4^{2-} 去除率随进水 SO_4^{2-} 浓度的降低而升高,考虑产物反馈抑制和菌群竞争并结合出水要求,进水 SO_4^{2-} 浓度控制在 0.8 g/L 左右效果较好。 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 2$ 时, SO_4^{2-} 去除效果最好。

3) 反应器按照海绵+K3 混合填料、 $\text{HRT} = 12 \text{ h}$ 、进水 SO_4^{2-} 浓度 0.8 g/L 左右、 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 2$ 的最佳条件长期连续运行,整体效果稳定。 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,出水 SO_4^{2-} 浓度可以达到 0.10 g/L 左右, SO_4^{2-} 去除率达到 87.9% ,表现了反应器在适宜温度下优异的 SO_4^{2-} 处理性能。当反应器因温度降低效果变差时,可通过延长 HRT 使出水 SO_4^{2-} 达标。

参考文献

- [1] 孙占学,马文洁,刘亚洁,等.地浸采铀矿山地下水环境修复研究进展[J].地学前缘,2021,28(5):215-225.
SUN Z X,MA W J,LIU Y J, et al. Research progress on groundwater contamination and remediation in in-situ leaching uranium mining [J]. Earth Science Frontiers,2021,28(5):215-225.
- [2] IAEA. In situ leach uranium mining: An overview of operations[R]. IAEA Nuclear Energy Series NF-T-1.4, Vienna:IAEA,2016.
- [3] 黎广荣,周义朋,赵凯,等.砂岩型铀矿浸出矿物工艺学

- 研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8): 9-19.
- LI G R, ZHOU Y P, ZHAO K, et al. Research progress on mineral leaching technology of sandstone type uranium deposits[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(8): 9-19.
- [4] 梁海. 填料床厌氧生物反应器处理含高硫酸盐矿井废水研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
- LIANG H. Study on the treatment of high sulfate-containing mine wastewater with packed bed anaerobic bioreactor[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020.
- [5] 吴开轩, 吴昭君, 孙庆业. 秸秆作为硫酸盐还原体系替代C源的可行性及其影响因子[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(5): 814-821.
- WU K X, WU Z J, SUN Q Y. Feasibility of straw as a sulfate reduction system to replace C source and its influencing factors[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2021, 48(5): 814-821.
- [6] 张杰, 龙琦, 李彦成, 等. 酸性矿山废水与选矿废水协同生化处理研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(7): 94-98, 102.
- ZHANG J, LONG Q, LI Y C, et al. Research on synergistic biochemical treatment of acid mine wastewater and mineral processing wastewater[J]. *Water Treatment Technology*, 2020, 46(7): 94-98, 102.
- [7] POSTGATE J R. The sulphate-reducing bacteria[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- [8] 吴开轩. 以稻草为碳源的酸性矿山废水处理体系构建[D]. 合肥: 安徽大学, 2021.
- WU K X. Construction of acid mine wastewater treatment system with straw as carbon source[D]. Hefei: Anhui University, 2021.
- [9] 史艳琨. 植物碳源-硫反硝化强化城市污水厂尾水脱氮研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- SHI Y K. Research on plant carbon source-sulfur denitrification to enhance denitrification of tail water from urban sewage plants[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [10] 吕琦. 基于SRB修复的酸性矿山废水与生活污水共处理及微生物群落特征[D]. 济南: 济南大学, 2021.
- LYU Q. Co-treatment of acidic mine wastewater and domestic sewage based on SRB remediation and microbial community characteristics[D]. Ji'nan: Ji'nan University, 2021.
- [11] 彭义华, 安瑞, 程柏森, 等. 一种溶解性难生物降解化学需氧量的测定评价方法[J]. 工业水处理, 2021, 41(12): 123-126.
- PENG Y H, AN R, CHENG B S, et al. A method for the determination and evaluation of chemical oxygen demand for solubility and refractory biodegradation[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(12): 123-126.
- [12] 吴静, 周红明, 姜洁. 水力剪切力对厌氧反应器启动的影响[J]. 环境科学, 2010(2): 368-372.
- WU J, ZHOU H M, JIANG J. The influence of hydraulic shear force on the startup of anaerobic reactor[J]. *Environmental Science*, 2010(2): 368-372.
- [13] 夏子翔, 李祥, 黄勇, 等. 氨基酸废水处理工艺脱氮效能提升工程改造[J]. 水处理技术, 2022, 48(1): 141-146.
- XIA Z X, LI X, HUANG Y, et al. Engineering transformation of denitrification efficiency improvement of amino acid wastewater treatment process[J]. *Water Treatment Technology*, 2022, 48(1): 141-146.
- [14] 季军远, 林久淑, 朱晓桐, 等. ANAMMOX-UASB反应器启动过程中的生物特性[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3358-3367.
- JI J Y, LIN J S, ZHU X T, et al. Biological characteristics during the start-up of ANAMMOX-UASB reactor[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(10): 3358-3367.
- [15] 王凯军. 厌氧生物技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- WANG K J. Anaerobic biotechnology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [16] 杨宏, 陈伟, 谭科艳, 等. 利用小空间厌氧移动床还原硫酸盐的试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(7): 1102-1107.
- YANG H, CHEN W, TAN K Y, et al. An experimental study on the reduction of sulfate by anaerobic moving bed in a small space[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, 42(7): 1102-1107.
- [17] SAHINKAYA E, GUNES F M, UCAR D, et al. Sulfidogenic fluidized bed treatment of real acid mine drainage water[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 683-689.