

电流强度对三维电极生物膜与硫自养耦合脱氮的影响

王旭峰¹, 丛培龙¹, 何培弘¹, 李 尔¹, 杨 涛¹, 杨 开²

(1. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对地下水中的硝酸盐,采用三维电极生物膜与硫自养耦合工艺对其进行去除,并研究了电流强度对该工艺脱氮特性的影响。结果表明,电流强度对耦合反应器的脱氮效果影响较大, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率随电流强度的增大而增大;在温度为 $20 \sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 、进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 70 mg/L 左右、进水 NaHCO_3 浓度为 1 g/L 、进水pH值为 $7.0 \sim 7.5$ 、HRT为 16 h 、电流强度为 400 mA 的条件下,反应器对硝酸盐氮的平均去除率为 97.15% ;反应器内有二次污染物 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 SO_4^{2-} 的生成积累,且 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累浓度随电流强度的增大急剧下降,而 SO_4^{2-} 的积累浓度随电流强度的增大逐渐上升;氢自养反硝化所占比例随电流强度的增大而减小,而硫自养反硝化所占比例随电流强度的增大而增大;反应器去除单位 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的电耗随电流强度的增大而增大。

关键词: 地下水; 硝酸盐; 三维电极生物膜; 硫自养反硝化; 电流强度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0022-06

Effect of Current Intensity on Denitrification of Three-dimensional Electrode Biofilm Coupled with Sulfur Autotrophic Process

WANG Xu-feng¹, CONG Pei-long¹, HE Pei-hong¹, LI Er¹, YANG Tao¹, YANG Kai²

(1. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430023, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The three-dimensional electrode biofilm coupled with sulfur autotrophic denitrification process was used to remove nitrate in groundwater, and the effect of current intensity on the denitrification characteristics of the coupled process was explored. Current intensity had a great influence on the denitrification effect of the coupled process, and the removal rate of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ increased with the increase of current intensity. The average removal rate of nitrate was 97.15% when the temperature was $20 \sim 25\text{ }^\circ\text{C}$, influent nitrate concentration was about 70 mg/L , influent NaHCO_3 concentration was 1 g/L , influent pH was $7.0 \sim 7.5$, HRT was 16 h and current intensity was 400 mA . There were formation and accumulation of secondary pollutants $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and SO_4^{2-} in the reactor, and the accumulation concentration of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ decreased sharply with the increase of current intensity, while the accumulation concentration of SO_4^{2-} increased gradually with the increase of current intensity. With the increase of current intensity, the proportion of hydrogen autotrophic denitrification decreased, while the proportion of sulfur autotrophic denitrification increased. The power consumption of the reactor to remove unit $\text{NO}_3^- - \text{N}$ increased with the increase of current intensity.

Key words: groundwater; nitrate; three-dimensional electrode biofilm; sulfur autotrophic denitrification; current intensity

硝酸盐可长期稳定溶于水而不发生化学性质的改变,是地下水的主要污染物之一。去除硝酸盐的方法主要有物理法、生物法、化学法等,其中生物法又可以分为异养反硝化脱氮和自养反硝化脱氮。地下水中的有机物含量往往较低,采用异养反硝化脱氮技术存在额外投加有机碳源的问题,而自养反硝化脱氮技术无需额外投加有机碳源即可实现对硝酸盐的去除,降低处理成本的同时还可以有效避免因投加有机碳源而引起的二次污染。

三维电极生物膜与硫自养耦合脱氮工艺是一种将传统三维电极生物膜技术和硫自养反硝化技术耦合在一起以实现协同脱氮的新技术。在耦合系统中,硫自养微生物能以填充的硫单质为电子供体,氢自养微生物能以阴极产生的氢气为电子供体,利用水中的 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和阳极石墨棒电解产生的 CO_2 作为生长繁殖所需的无机碳源,将 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还原为 N_2 [1-3]。与单一的硫自养反硝化工艺或三维电极生物膜工艺相比,耦合工艺具有明显的优势:系统内氢自养反硝化过程产生的碱度与硫自养反硝化过程消耗的碱度共同作用,从而为自养反硝化细菌提供适宜的生长环境;硫自养反硝化过程中产生的 H^+ 可以作为三维电极生物膜阴极产氢的前驱物,从而提高系统的产氢速率。

电流强度是影响三维电极生物膜与硫自养耦合工艺脱氮效果的一个关键因素,它直接决定了阴极表面的产氢速率,同时电流强度的变化还可引起自养反硝化细菌体内硝酸盐还原酶活性的变化,从而影响到耦合系统的脱氮效果。任晓克[4]的研究表明,多维电极生物膜反应器对 TN 的去除率随着电流强度的增大呈先升高后降低的趋势,当电流强度为 200 mA 时对 TN 的去除率最大;而孟成成[5]的研究表明,当电流强度在 60 ~ 800 mA 范围内变化时,电流强度对三维电极生物膜与硫自养耦合脱氮反应器去除 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的影响较小。鉴于此,笔者设计了一种新型的三维电极生物膜与硫自养耦合脱氮装置,并重点探究了电流强度对耦合系统脱氮特性的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验采用连续升流式的三维电极生物膜与硫自养耦合反应器,如图 1 所示。反应器采用有机玻璃制成,内径为 24 cm,总高度为 100 cm,有效容积为

20 L。阴极为紧贴反应器内壁的活性炭纤维毡,表面积约为 $6\,782.4\text{ cm}^2$;阳极为 5 根对称布置于反应器内的 $\varnothing 10\text{ mm}$ 石墨棒;反应器底部为 10 cm 高的卵石承托层;反应器的阴极和阳极之间按体积比为 1 : 1 填充柱状活性炭颗粒(粒径为 2 ~ 3 mm,柱长为 4 ~ 7 mm)与硫颗粒(粒径为 3 ~ 5 mm)的均匀混合物充当第三电极,混合填料高度为 60 cm。

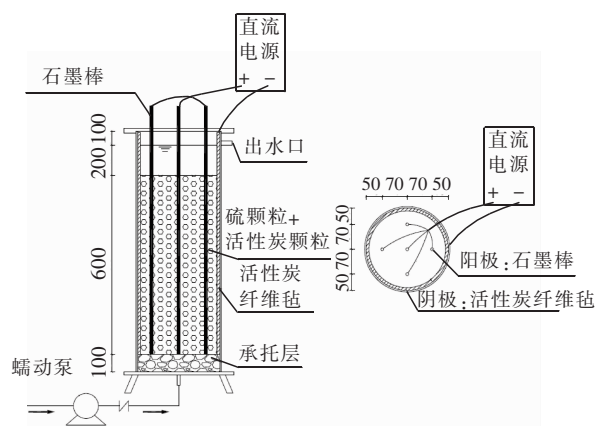


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Diagram of experimental device

1.2 试验进水

试验进水为模拟地下水,通过向自来水中投加 NaNO_3 、 KH_2PO_4 、 K_2HPO_4 、 NaHCO_3 、 MgCl_2 、微量元素等配制而成,具体水质如下: $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 70 mg/L, TP 为 7 mg/L, NaHCO_3 为 1 g/L, MgCl_2 为 50 mg/L, pH 值为 7.0 ~ 7.5,微量元素为 0.2 mL/L。微量元素贮备液的组成如下: $\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 0.12 g/L; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.12 g/L; $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 1.5 g/L; CaCl_2 , 1.5 g/L; $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 1.5 g/L; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.03 g/L; KI , 0.2 g/L; H_3BO_3 , 0.15 g/L; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.06 g/L。

1.3 检测项目及方法

$\text{NO}_3^- - \text{N}$: 紫外分光光度法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: $\text{N} - (1 - \text{萘基}) - \text{乙二胺}$ 分光光度法; SO_4^{2-} : EDTA 滴定法; pH 值: pH 计; 温度: 温度计。

1.4 试验方法

按照接种、挂膜、驯化的顺序启动反应器。接种污泥取自武汉市沙湖污水处理厂二沉池,挂膜初始阶段,将活性污泥投加到挂膜启动液($\text{NO}_3^- - \text{N} = 30\text{ mg/L}$, TP = 3 mg/L, $\text{NaHCO}_3 = 2\text{ g/L}$, $\text{MgCl}_2 = 50\text{ mg/L}$)中均匀搅拌形成混合液,混合液从反应器进水口泵入,流经混合填料后从反应器出水口回流至进水

桶中,同时向启动液中添加少量的 CH_3COONa 以保证反应器内的微生物能快速繁殖;采用混合液循环挂膜1周后,反应器出水不再回流至进水桶中,重新配制新鲜的启动液,1周后观察到混合填料及活性碳纤维毡的表面上均出现了一层薄薄的生物膜,这表明耦合反应器挂膜完成;随后通过联合调整进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度 ($30 \text{ mg/L} \rightarrow 60 \text{ mg/L} \rightarrow 70 \text{ mg/L}$)、TP 浓度 ($3 \text{ mg/L} \rightarrow 6 \text{ mg/L} \rightarrow 7 \text{ mg/L}$)、 NaHCO_3 浓度 ($2 \text{ g} \rightarrow 1 \text{ g}$) 以及水力停留时间 ($24 \text{ h} \rightarrow 20 \text{ h} \rightarrow 18 \text{ h} \rightarrow 16 \text{ h}$)、电流强度 ($50 \text{ mA} \rightarrow 80 \text{ mA} \rightarrow 100 \text{ mA}$) 等参数对生物膜进行培养驯化,待出水各项水质指标趋于稳定后,即认为驯化完成。

为探究电流强度对耦合反应器脱氮特性的影响,反应器启动成功后,在温度为 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 、进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 70 mg/L 左右、进水 NaHCO_3 浓度为 1 g/L 、进水 pH 值为 $7.0 \sim 7.5$ 、HRT 为 16 h 的条件下,在 $100 \sim 400 \text{ mA}$ 的电流强度范围内进行梯度试验,监测进出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 SO_4^{2-} 浓度的变化情况。每个电流强度的试验时间均为 9 d ,由于电流强度调整后反应器内自养反硝化细菌的脱氮能力需要经过 3 d 左右才能重新趋于稳定,因此以每个电流强度试验后 6 d 水质指标监测值的平均值作为该电流强度下反应器的出水水质指标值。

2 结果与分析

2.1 电流强度对脱氮效果的影响

2.1.1 对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除效果的影响

图2为不同电流强度下耦合反应器对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果。

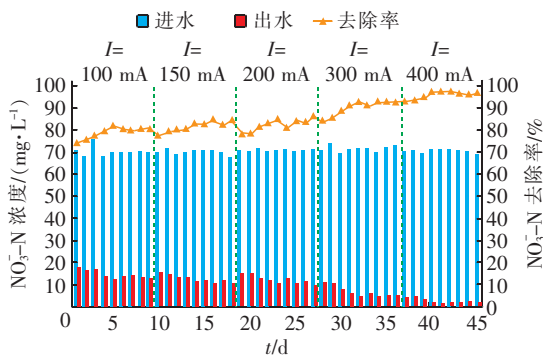


图2 电流强度对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除效果的影响

Fig.2 Effect of current intensity on $\text{NO}_3^- - \text{N}$ removal effect

由图2可以看出,当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在 70 mg/L 左右时,随着电流强度的不断增大,耦合反应

器出水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度呈下降趋势,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率呈上升趋势。当加载在反应器阴阳极间的电流强度增大至 400 mA 时,反应器对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均去除率为 97.15% ,几乎实现了对进水中硝酸盐氮的完全去除。

耦合反应器对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率随电流强度的增大而增大,推测原因如下:①电流强度的增大能够促进阴极表面生成更多的氢气,加速阳极石墨棒电解生成更多的 CO_2 ,从而为自养微生物提供更多的电子供体和无机碳源;②电流强度的增大能刺激自养微生物体内硝酸盐还原酶的活性^[6],从而促进自养微生物对电子供体 H_2 和单质 S 的利用,提高了系统的反硝化效率。

2.1.2 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 SO_4^{2-} 积累量的影响

以反应器进出水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 SO_4^{2-} 的浓度差作为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 SO_4^{2-} 的积累量,电流强度对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 SO_4^{2-} 积累量的影响如图3所示。

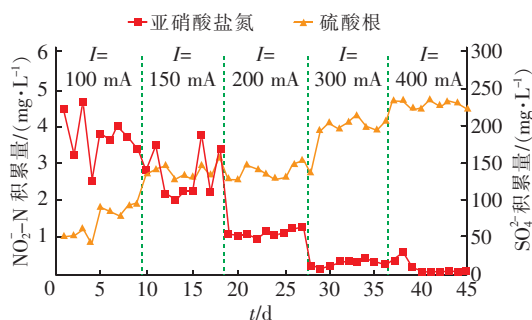


图3 电流强度对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 及 SO_4^{2-} 积累量的影响

Fig.3 Effect of current intensity on the accumulation of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and SO_4^{2-}

由图3可知, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累量随电流强度的增大而急剧下降,当加载在反应器阴阳极间的电流强度增大至 400 mA 时,反应器内几乎无 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的生成积累。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化为 N_2 需经过如下过程: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 作为反硝化过程的中间产物,其积累量急剧减小表明反硝化过程越来越完全。与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累量的变化趋势相反, SO_4^{2-} 的积累量随电流强度的增大而迅速上升,表明越来越多的单质 S 作为电子供体被硫自养反硝化细菌利用,这符合反应器对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率随电流强度的增大而增大这一变化趋势。另外,相关研究^[7-8]指出, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可能会经微生物的同化还原作用或电解反应转化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,但在本试验过

程中并未检测到 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的生成。

2.1.3 对氢自养与硫自养所占比例的影响

反应器内存在的电子供体主要是单质硫及阴极表面电解产生的氢气,假定系统内的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 完全由氢自养反硝化和硫自养反硝化作用去除,根据 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 还原为 N_2 的电子转移数量以及 N 、 S 、 O 的相对原子质量可得反应器每处理 1 L 模拟地下水消耗的电子总量为:

$$T_e = \frac{(S_0 - S_e) \times 10^{-3}}{14} \times 5 - \frac{C_{\text{NO}_2^- - \text{N}} \times 10^{-3}}{14} \times 3 \quad (1)$$

由文献[2]所给出的硫自养反硝化方程式可知,系统内每生成积累 1 mol SO_4^{2-} 可相应去除 0.955 mol $\text{NO}_3^- - \text{N}$,则每处理 1 L 模拟地下水由单质硫提供的电子量为:

$$T_s = \frac{C_{\text{SO}_4^{2-}} \times 10^{-3}}{96} \times 5 \times 0.955 \quad (2)$$

则硫自养反硝化所占比例 η_s 及氢自养反硝化所占比例 η_h 分别为:

$$\eta_s = \frac{T_s}{T_e} \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta_h = 1 - \eta_s \quad (4)$$

式中: S_0 、 S_e 分别为进、出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度,mg/L; $C_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ 为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累量,mg/L; $C_{\text{SO}_4^{2-}}$ 为 SO_4^{2-} 的积累量,mg/L。

将试验数据代入以上公式,计算结果如图4所示。可以看出,氢自养反硝化所占比例随电流强度的增大而减小,而硫自养反硝化所占比例随电流强度的增大而增大,推测原因可能是电流强度的增大对硫自养微生物体内硝酸盐还原酶活性的促进作用更大,因而系统内更多的单质 S 被硫自养微生物利用,同时电流强度增大到一定程度后对氢自养细菌产生了“氢抑制”效应^[9]。邹卓成^[10]的研究指出,当电流强度在 50 ~ 300 mA 范围内变化时,硫自养反硝化所占比例呈先减小后增大的趋势,而氢自养反硝化所占比例呈先增大后减小的趋势,当电流强度增大到 300 mA 时,氢自养反硝化受到抑制,由此可见,该文献的试验结果与本研究结果既有相似性又有差异性,相似性主要体现在电流强度增大到一定程度后都会对氢自养反硝化产生一定的抑制作用,而差异性主要体现为试验结果在变化趋势上不尽相同,造成这种差异的原因主要是试验装置、进水

负荷、运行参数等的不同。

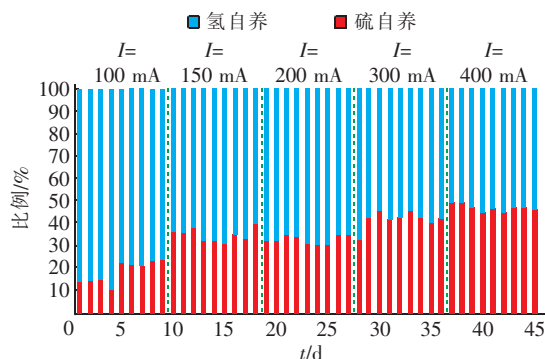


图4 电流强度对氢自养反硝化及硫自养反硝化比例的影响

Fig.4 Effect of current intensity on proportion of hydrogen autotrophic denitrification and sulfur autotrophic denitrification

2.2 不同电流强度下的电耗分析

电流强度不仅直接决定了耦合反应器阴极可产生电子供体 H_2 的数量,还会影响自养微生物体内硝酸盐还原酶的活性,从而影响到耦合反应器对硝酸盐氮的去除效果,采用如下公式对反应器进行电耗分析:

$$W = U \times I \times t \quad (5)$$

式中: W 为 t 时间内反应器的电耗,kW · h; U 为 t 时间内阴阳极间的平均电压,V; I 为 t 时间内接入反应器的电流强度,A。

反应器去除单位 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的电耗为:

$$N_e = \frac{UI}{Q(S_0 - S_e)} = \frac{UI \cdot \text{HRT}}{V(S_0 - S_e)} \quad (6)$$

式中: N_e 为反应器去除单位 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的电耗,kW · h/g; V 为反应器的有效容积,L; Q 为进水流量,L/s。

式(6)未考虑中间产物 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的生成积累,由于系统内存在 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累,需要将 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累量折算成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度。根据 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 还原为 N_2 的电子转移数量,理论上 1 mol $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 可等效于 0.6 mol $\text{NO}_3^- - \text{N}$,故有:

$$S_e^* = C_{\text{NO}_3^- - \text{N}} + 0.6C_{\text{NO}_2^- - \text{N}} \quad (7)$$

式中: S_e^* 为等效出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度,mg/L; $C_{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为实测出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度,mg/L; $C_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ 为出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度,mg/L。

将不同电流强度下进出水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累浓度以及各电流强度所对应的平均电压值等数据代入以上公式进行计算,结果见表1。可知,在试验条件下,电流强度从 100 mA 增大到

400 mA 的过程中,反应器去除单位 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的电耗从 $0.0039 \text{ kW} \cdot \text{h/g}$ 逐渐升高到 $0.0231 \text{ kW} \cdot \text{h/g}$ 。Liu 等人的研究表明^[11],电化学氧化法去除单位

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的电耗在 $0.007 \sim 0.1 \text{ kW} \cdot \text{h/g}$ 范围内,本研究所采用的耦合脱氮工艺在电耗方面优于该文献所报道的电化学氧化法。

表 1 不同电流强度下的电耗分析

Tab.1 Power consumption analysis under different current intensity

I/mA	$C_{\text{NO}_3^- - \text{N}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$C_{\text{NO}_2^- - \text{N}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$S_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$S_e^*/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	U/V	$N_e/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1})$
100	13.60	3.51	69.93	15.70	2.61	0.0039
150	11.81	2.64	70.09	13.40	3.02	0.0064
200	11.26	1.14	70.96	11.94	3.38	0.0092
300	5.46	0.34	71.67	5.67	4.19	0.0152
400	2.01	0.09	70.80	2.07	4.96	0.0231

反应器去除单位 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的电耗随电流强度的增大而上升,这反映出反应器对电能的有效利用率随电流强度的增大而降低,理论上减小加载在耦合反应器阴阳极间的电流强度可以提高反应器的电能有效利用率。但需要注意的是,实际运行中电流强度并不是越小越好,这是因为反应器对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率随电流强度的减小而下降,过低的电流强度会导致出水水质变差,因此最佳电流强度应为在达到目标去除率条件下单位处理电耗最小所对应的电流强度值。

3 结论

① 电流强度对耦合反应器的脱氮效果有较大影响, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率随电流强度的增大而增大。在温度为 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 、进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 70 mg/L 左右、进水 NaHCO_3 浓度为 1 g/L 、进水 pH 值为 $7.0 \sim 7.5$ 、HRT 为 16 h 、电流强度为 400 mA 的条件下,反应器对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均去除率为 97.15% 。

② 耦合反应器内无 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的生成积累,但存在一定程度的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累。随着电流强度的增大,中间产物 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累量急剧减少,当电流强度增大到 400 mA 时,反应器内几乎无 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的生成积累。

③ 电流强度的增大可促进硫自养细菌对单质 S 的利用,从而致使 SO_4^{2-} 的积累量随电流强度的增大而增大,在电流强度为 400 mA 时,出水中 SO_4^{2-} 的平均积累浓度达到最大值即 228.40 mg/L ,但仍满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中 SO_4^{2-} 浓度不能超过 250 mg/L 的限值要求。

④ 氢自养反硝化所占比例随电流强度的增大而减小,硫自养反硝化所占比例随电流强度的增大

而增大。

⑤ 耦合反应器去除单位 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的电耗随电流强度的增大而增大,电流强度越大,反应器对电能的有效利用率就越低。

参考文献:

- [1] Zhou M, Fu W, Gu H, et al. Nitrate removal from groundwater by a novel three-dimensional electrode biofilm reactor[J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52(19): 6052–6059.
- [2] Koenig A, Liu L H. Kinetic model of autotrophic denitrification in sulphur packed-bed reactors[J]. *Water Res*, 2001, 35(8): 1969–1978.
- [3] 马航,朱强,朱亮,等. 单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2235–2242.
Ma Hang, Zhu Qiang, Zhu Liang, et al. Effect of element sulfur particle size and type of the reactor on start-up of sulfur-based autotrophic denitrification reactor [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6): 2235–2242 (in Chinese).
- [4] 任晓克. 多维电极生物膜工艺反硝化脱氮性能研究[D]. 北京:北京工业大学,2015.
Ren Xiaoke. Study on Denitrification Performance of Multi-electrode Biofilm Process [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [5] 孟成成. 基于分子生物学技术的三维电极生物膜与硫自养耦合脱氮工艺研究[D]. 北京:北京工业大学,2014.
Meng Chengcheng. Study on the Coupled Three-dimensional Biofilm-electrode and Sulfur Autotrophic Denitrification System Based on Molecular Biological Techniques [D]. Beijing: Beijing University of

- Technology, 2014 (in Chinese).
- [6] 王建超,郝瑞霞,孟成成. 海绵铁/活性炭复合填料强化3DBER脱氮除磷特性[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11): 19-23.
- Wang Jianchao, Hao Ruixia, Meng Chengcheng. Enhanced removal of nitrogen and phosphorus in 3DBER filled with sponge iron and activated carbon[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(11): 19-23 (in Chinese).
- [7] 姚静华. 复三维电极-生物膜反应器脱除饮用水中硝酸盐的试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- Yao Jinghua. Nitrate Removal from Drinking Water by a Three-dimensional Biofilm-electrode Reactor [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 (in Chinese).
- [8] 陈建平. 三维电极生物膜反应器脱除低C/N值废水中硝酸盐氮和COD[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
- Chen Jianping. Removal of Nitrate Nitrogen and COD from Low C/N Wastewater by Three-dimensional Electrode-biofilm Reactor [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006 (in Chinese).
- [9] Park H I, Kim D K, Choi Y J, *et al.* Nitrate reduction using an electrode as direct electron donor in a biofilm-electrode reactor[J]. Process Biochem, 2005, 40(10): 3383-3388.
- [10] 邹卓成. 生物电化学氢自养和硫自养耦合脱氮工艺及其微生物种群结构研究[D]. 武汉:武汉大学, 2017.
- Zou Zhuocheng. Research on the Coupled Bioelectrochemical Hydrogen Autotrophic Denitrification with Sulfur Autotrophic Denitrification Technology and the Microbial Community Structure[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017 (in Chinese).
- [11] Liu W, Ai Z, Zhang L. Design of a neutral three-dimensional electro-Fenton system with foam nickel as particle electrodes for wastewater treatment [J]. J Hazard Mater, 2012, 243(4): 257-264.



作者简介:王旭峰(1992-),男,贵州铜仁人,硕士,工程师,主要从事水处理工艺技术和市政给排水工程设计工作。

E-mail: wangxufengwhuer@163.com

收稿日期: 2019-05-21

