

文章编号:1673-1689(2007)04-0051-05

EGSB反应器中SRB污泥颗粒化的工艺条件

苏冰琴, 李亚新

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 采用小试规模的EGSB反应器, 接种厌氧絮状污泥, 培养出SRB颗粒污泥并研究了SRB颗粒污泥形成的工艺条件与影响因素。研究表明, 进水 SO_4^{2-} 负荷、碳氮磷源、COD与 SO_4^{2-} 质量浓度比、反应器的启动方式、水力负荷、微量元素、 H_2S 、pH、温度等是影响SRB污泥颗粒化的主要工艺条件。

关键词: EGSB反应器; 硫酸盐还原菌; 颗粒污泥

中图分类号: X 703

文献标识码: A

The Forming Conditions of Sulphate-Reducing Bacteria Granular Sludge in Expanded Granular Sludge Blanket Reactor

SU Bing-qin, LI Ya-xin

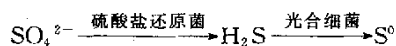
(Department of Environment Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In lab-scale, with anaerobic floccules sludge as sludge source, sulphate-reducing bacteria granular sludge was cultivated. The operation conditions of SRB granular sludge form were studied. The results indicated that inflow sulfate concentration, carbon source, nitrogen source and phosphate source, the ratio of COD to sulfate, start-up way of reactor, hydraulic loading, trace elements, hydrogen sulfide, pH, temperature were the key factors what affect the formation of SRB sludge granular.

Key words: expanded granular sludge blanket reactor; sulphate-reducing bacteria; granular sludge

化工、制药、制革、造纸、发酵、食品加工和采矿等领域在生产过程中排放出大量高浓度 SO_4^{2-} 工业废水。这些含 SO_4^{2-} 废水的排放带来了严重的环境问题。目前, 这些高浓度 SO_4^{2-} 工业废水多采用微生物处理法, 即利用硫酸盐还原菌(Sulphate-Reducing Bacteria) SRB将 SO_4^{2-} 还原为 H_2S 并进一步将 H_2S 氧化为单质 S^0 ;

微生物法处理 SO_4^{2-} 废水的核心是硫酸盐还原菌。在 SO_4^{2-} 生物还原反应器中培养出高活性的



微生物法处理 SO_4^{2-} 废水的核心是硫酸盐还原菌。在 SO_4^{2-} 生物还原反应器中培养出高活性的

收稿日期: 2006-08-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50278060); 山西省留学归国人员基金项目(2002-19); 山西省自然科学基金项目(2006011044).

作者简介: 苏冰琴(1972-), 女, 山西忻州人, 讲师, 环境工程博士研究生. Email: sbq3000@126.com

责任作者: 李亚新(1941-), 男, 辽宁义县人, 工学博士, 教授, 博导, 主要从事污染控制工程方面的研究. Email: Liyaxin1941@yahoo.com.cn

SRB 颗粒污泥是使 SO_4^{2-} 有效还原、有机物有效净化的重要前提^[2-3]。SRB 污泥颗粒化可提高其沉降性能,保持反应器中较高的污泥浓度,提高反应器的处理效能,而且可以使污泥具有较高的活性,提高污泥抵抗冲击负荷和外部不利条件的能力。

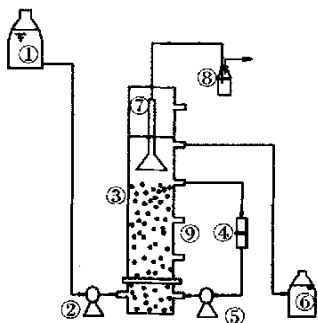
厌氧膨胀颗粒污泥床(Expanded Granular Sludge Blanket, EGSB)反应器是在 UASB 反应器的基础上发展起来的第 3 代厌氧生物反应器,与 UASB 反应器相比,EGSB 反应器增加了出水回流,使得反应器内的液体上升流速远远高于 UASB 反应器,很大程度上促进了颗粒污泥的形成^[4]。

作者研究了在 EGSB 反应器中 SRB 污泥的颗粒化过程,并探讨了 SRB 颗粒污泥的形成条件及影响因素。

1 材料与方法

1.1 流程与设备

硫酸盐生物还原反应器为有机玻璃加工制成的 EGSB 反应器,圆柱形,有效容积为 1.7 L,内径 60 mm,有效水深 600 mm,高径比为 10。反应器安装在恒温箱内,通过温控仪控制温度在 30~35℃,工艺流程见图 1。



①进水瓶;②进水泵;③ EGSB 反应器;④过滤器;⑤回流泵;⑥出水瓶;⑦三相分离器;⑧碱液吸收装置;⑨取样口

图 1 EGSB 反应器工艺流程图

Fig. 1 The schematic diagram of EGSB craft process

1.2 试验用水

试验用水为煮沸除氯的自来水加葡萄糖、 Na_2SO_4 、 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 配制而成, $\text{COD}:\text{N}:\text{P}=300:5:1$, $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}=2:1$, 同时加入铁、钴、镍微量元素和酵母粉以满足微生物生长的需要,并补充铁、锰、钙等元素以增强颗粒污泥密度,表 1 列出了试验中常量和微量金属元素的投加量。

1.3 接种污泥

实验接种的污泥取自太原市河西北中部污水处理厂,其 VSS/SS 为 0.46~0.48,接种污泥量为

9.5 gVSS/L。接种前用葡萄糖和无水 Na_2SO_4 配制的废水进行间歇驯化(驯化液中 SO_4^{2-} 质量浓度 1 000 mg/L, $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}=2:1$),同时加入微量元素 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 ,其 $\text{COD}:\text{N}:\text{P}=300:5:1$ 。

表 1 金属元素投加量

Tab. 1 Amounts of nutrient elements fed into reactors

元素名称	投加标准/(mg/(L·d))	化合物形式	投加量/(mg/(L·d))
Fe	104	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	369.6
Mg	12	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	101.5
Ca	100	CaCl_2	277.5
Co	0.1	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.4
Ni	0.2	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.8

1.4 分析项目及方法

分析项目 SO_4^{2-} 、 COD 、 S^{2-} 、 VSS 、 pH 值均按标准方法进行测定^[5]。

SRB 颗粒污泥的粒径测定采用如下方法:在混合均匀的 EGSB 反应器中取 10 mL 左右的混合液,用清水洗去细微絮状污泥,将颗粒污泥均匀涂到载玻片上,盖上盖玻片。在光学显微镜下用显微镜微尺测量颗粒污泥的尺寸,数量为 50~100 个。根据 Sauter 公式计算粒径^[6]:

$$d = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_i b_i^2)^{1/3} \quad (1)$$

式中: m 为颗粒污泥数量(个), a_i 为颗粒长度(mm), b_i 为颗粒宽度(mm); d 为颗粒平均粒径(mm)。

2 SRB 颗粒污泥的形成过程

根据 SRB 污泥形态的变化,从 EGSB 反应器接种启动到整个污泥床完全颗粒化,可分为 3 个时期:启动期、颗粒出现期和颗粒成熟期。

2.1 启动期

EGSB 反应器的接种污泥为较松散的絮体污泥,经过启动期(1~56 d)运行,SRB 的活性有所提高,较松散的污泥后期成为凝聚性能较好的絮体污泥。由于没有采用出水回流,水力负荷较低($0.03 \sim 0.06 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$),污泥流失现象不明显。

2.2 颗粒出现期

在 57~153 d 运行日,EGSB 污泥床中出现了 SRB 颗粒污泥,初期出现的颗粒污泥直径约为 0.1~0.2 mm,随着运行时间的延长,颗粒污泥数量逐渐增多,粒径逐渐增大,部分粒径可达 1 mm 以上。

由于采用出水回流,水力负荷为 $0.2\sim2.5\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,存在污泥流失现象。

2.3 颗粒成熟期

在 $154\sim202\text{ d}$,水力负荷由 $2.5\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 提高到 $4.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,絮状污泥逐渐减少,粒径大于 1 mm 的污泥颗粒所占比例明显增加,污泥量 VSS 开始回升,最后整个污泥床实现颗粒化,SRB 污泥颗粒平均粒径约为 $1\sim3\text{ mm}$,最大可达 3.5 mm 。表 2 为实验过程中硫酸盐还原运行参数及结果。

表 2 实验过程中硫酸盐还原运行参数及结果
Tab. 2 Operation parameters and results of SO_4^{2-} reduction in the course of experiment

运行期	运行日/ d	进水 SO_4^{2-} 质量浓度/ (mg/L)	SO_4^{2-} 去除率/ %	SO_4^{2-} 负荷/ ($\text{kgSO}_4^{2-}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$)	污泥浓度/ (kgVSS/m^3)	污泥负荷/ ($\text{kgSO}_4^{2-}/(\text{kgVSS}\cdot\text{d})$)	回流比 R	水力负荷/ ($\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$)
启动期	1~46	900~1 200	25~71	1.06~1.41	9.5	0.120	0	0.03
	47~56	550~750	50~79	1.29~1.76	10.2	0.139	0	0.06
颗粒污泥 出现期	57~63	550~650	68~82	1.29~1.53	11.8	0.120	0	0.06
	64~82	650~900	73~92	1.53~2.12	7.0	0.268	2.5~12.5	0.2~0.8
	83~105	850~1 100	65~89	2.00~2.59	7.3	0.342	12.5~26	0.8~1.6
	106~153	1 500~1 700	50~88	3.53~4.00	8.9	0.420	26~41.5	1.6~2.5
颗粒污泥 成熟期	154~175	1 550~1 650	80~90	3.65~3.88	9.0	0.420	50	3.0
	176~190	1 850~2 100	66~70	4.35~4.94	9.4	0.420	66.75	4.0
	191~202	1 900~2 150	63~85	4.47~5.06	9.5	0.421	66.75	4.0

图 2 为 SRB 颗粒污泥的扫描电镜照片,图 3 为颗粒剖面图,颗粒内部有少量空洞,应该是产气通道。图 4,5 为 SRB 颗粒污泥表面的电镜扫描照片,颗粒表面的杆菌和弧菌,分布很致密且均匀,表面还共存在着短杆菌和少量球菌。SRB 颗粒污泥的电镜照片显示,在 EGSB 反应器中已形成了规则、密实、光滑的颗粒污泥。颗粒污泥表面和内部的微生物均呈分区分布。根据 SRB 菌种形状判断,反应器中形成了脱硫弧菌、脱硫肠状菌和少量脱硫球菌等。

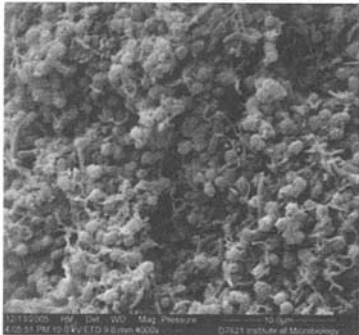
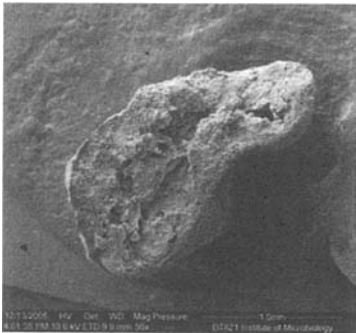


图 2 EGSB 反应器颗粒污泥电镜照片(80×)
Fig. 2 SEM picture of granules sludge in EGSB reactor

图 3 EGSB 反应器颗粒污泥剖面电镜照片(50×)
Fig. 3 SEM picture of granules sludge in EGSB reactor

图 4 EGSB 反应器颗粒污泥表面电镜照片(4000×)
Fig. 4 SEM picture of granules sludge surface in EGSB reactor

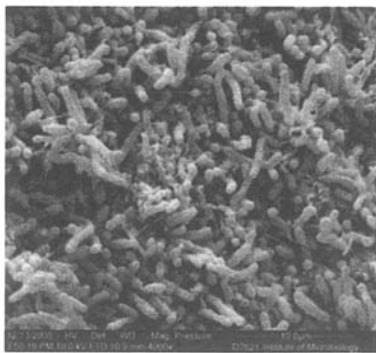


图5 EGSB反应器颗粒污泥表面电镜照片(4000×)

Fig.5 SEM picture of granules sludge surface in EGSB reactor

3 SRB 颗粒污泥形成条件

3.1 进水 SO_4^{2-} 负荷

SRB 和产甲烷菌(MPB)共生在同一体系中,驯化后的接种污泥中 MPB 仍较丰富。如反应器启动初期进水中 SO_4^{2-} 质量浓度及负荷较低,则有利于 MPB 生长、繁殖,而对 SRB 活性提高不利。为加快启动速度和 SRB 颗粒污泥的培养过程,反应器宜采用高负荷启动。高负荷启动有效地抑制了 MPB 的活性,提高了 SRB 的活性。试验中控制进水 SO_4^{2-} 质量浓度为 900~1 200 mg/L, SO_4^{2-} 负荷为 1.0~2.0 kg $\text{SO}_4^{2-}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 成功地启动了 EGSB 反应器。

3.2 反应器的启动方式

由于接种的絮状污泥的沉淀性能差,采用回流的方式难以有效控制其膨胀程度,并会造成污泥的大量流失。故在 EGSB 反应器启动初期,暂时不进行回流,先使反应器按 UASB 反应器的运行方式培养出颗粒污泥^[7]。此后增加出水回流,可促进颗粒污泥的形成。

3.3 碳源、氮源和磷源

培养以 SRB 为主的颗粒污泥,除需要足够的 SO_4^{2-} 外,还需要一定量的有机物作为碳源,以提供一个营养丰富环境,使其能够大量生长,并产生胞外多聚物,进而形成颗粒污泥。铵盐、磷酸盐也是大多数 SRB 生长所需的氮源和磷源。研究中分别采用葡萄糖、 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 作为 SRB 生长所需的碳源、氮源和磷源,同时控制 C : N : P = 300 : 5 : 1。在装置启动时,稍微增加氮素,有利于微生物的增殖,并于提高反应器的缓冲能力。

3.4 COD 与 SO_4^{2-} 质量浓度比

许多研究表明, COD/ SO_4^{2-} 值是 SRB 新陈代

谢的重要参数,也是影响 SRB 与 MPB 关系的重要指标,一般情况下, COD/ $\text{SO}_4^{2-} = (2 \sim 3) : 1$ 或 $(1.5 \sim 2.5) : 1$ 时就可取得理想的 SO_4^{2-} 去除率^[3]。研究中采用 COD/ $\text{SO}_4^{2-} = 2 : 1$ 。

3.5 水力负荷

水力负荷的作用主要是筛选沉降性能良好的污泥,淘汰结构松散、沉降性能差的絮状污泥。适宜的水力负荷还可及时将污泥床中 SO_4^{2-} 的还原产物——硫化物形成的 H_2S 气泡带出,减轻污泥因吸附小气泡对 SRB 造成的抑制影响。在反应器运行初期,进水中 SO_4^{2-} 保持在相对稳定的质量浓度范围内,负荷的提高靠逐步加大水力负荷来实现,在水力负荷约为 $0.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的条件下运行时,可促进颗粒污泥的形成和成长^[3]。颗粒污泥出现后,可逐渐加大水力负荷,减少水力停留时间,以促进颗粒污泥的快速形成。试验中 SRB 颗粒污泥由出现到成熟,对应的水力负荷由 $0.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 提高到 $4.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

3.6 微量元素

微量元素对微生物的良好生长也有重要作用。Fe、Co、Ni、Mg、K、S、Zn 等都是 SRB 生长所必需的微量元素。同时,在进水中保持适量的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 元素可增加颗粒污泥密度,加速颗粒污泥的生长。

3.7 接种污泥及接种量

厌氧污泥从反应器上部加入,接种量为 0.7 L, 占总容积的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。接种前污泥用葡萄糖和无水 Na_2SO_4 配制的废水进行间歇驯化,同时加入微量元素,并淘洗去除大颗粒杂物。

3.8 H_2S

研究表明,SRB 对 H_2S 的毒性影响相当敏感。试验中定期采用 N_2 吹脱驱出溶液中的 H_2S ;投加少量金属元素,使部分 H_2S 转化为硫化物沉淀,缓解 H_2S 的抑制作用;同时,采用出水回流可改善反应器内的水力条件和传质条件,提高体系耐受 H_2S 的能力。

3.9 氧化还原电位

一直以来的研究认为,SRB 属于严格厌氧菌,氧气(空气)以及氧化态化合物对 SRB 有着十分强烈的抑制作用。试验中加入 Na_2S 作为氧化还原平衡剂来保证 SRB 生长所需的氧化还原电位低于 -100 mV 。

3.10 pH 值

pH 值是影响 SRB 活性及发挥其最佳代谢功

能的主要因素之一。在培养SRB颗粒污泥时,用酸碱药剂调节进水,保证SRB生长pH值在中性偏碱(6.8~7.2)的范围内。

3.11 温度

温度直接决定SRB的生长速度与代谢活力,温度太低或太高均会抑制SRB的生长代谢活动,不利于培养颗粒污泥。试验中采用恒温箱和温控仪维持SRB的环境温度为30~35℃。

4 结 语

试验中,采用厌氧絮状污泥作为EGSB反应器的接种污泥,分别采用葡萄糖、 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 作

为SRB生长所需的碳源、氮源、磷源,同时控制 $\text{C}:\text{N}:\text{P}=300:5:1$, $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}\approx 2:1$,投加Fe、Co、Ni等微量金属元素,在 SO_4^{2-} 负荷为 $1.0\sim 2.0\text{ kg SO}_4^{2-}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,pH 6.8~7.2,温度为30~35℃,水力负荷由 $0.2\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 提高到 $4.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时成功地启动了EGSB反应器,培养出SRB颗粒污泥。

进水 SO_4^{2-} 负荷、SRB所需的碳氮磷源、COD与 SO_4^{2-} 质量浓度比、反应器的启动方式、水力负荷、微量元素、 H_2S 、pH值、温度等都影响SRB颗粒污泥的形成。

参考文献(References):

- [1] 李亚新,苏冰琴.利用硫酸盐还原菌处理酸性矿山废水研究[J].中国给水排水,2000,16(2):13-17.
LI Ya-xin, SU Bing-qin. Study on treatment of acid mining drainage using sulfate reducing bacteria [J]. *China Water and Wastewater*, 2000, 16 (2): 13-17. (in Chinese)
- [2] 缪应祺. 废水生物脱硫机理及技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [3] LA Hyun-joon, KIM Kyoung-ho, QUAN Zhe-xue, et al. Enhancement of sulfate reduction activity using granular sludge in anaerobic treatment of acid mine drainage[J]. *Biotechnology Letters*, 2003, 25: 503-508.
- [4] 胡纪萃. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [5] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [6] 沈东升,徐向阳,冯孝善. 厌氧处理含氯酚废水的颗粒污泥形成过程研究[J]. 环境科学学报,1997,11(1):60-67.
SHEN Dong-sheng, XU Xiang-yang, FENG Xiao-shan. Study on granular sludge forming process in anaerobic wastewater treatment containing chlorophenol[J]. *Environmental Science Academic Newspaper*, 1997, 11(1): 60-67. (in Chinese)
- [7] 左剑恶,王妍春,陈浩,等. EGSB反应器的启动运行研究[J]. 给水排水,2001,27(3):26-30.
ZUO Jian-e, WANG Yan-chun, CHEN Hao, et al. Study on start and running of EGSB reactor [J]. *Water and Wastewater*, 2001, 27(3): 26-30. (in Chinese)

(责任编辑:李春丽)