

硫酸盐废水生物处理工艺研究进展

王爱杰¹, 王丽燕², 任南琪¹, 杜大仲¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090, E-mail: waj0578@hit.edu.cn;

2. 哈尔滨学院 化学系, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘 要: 综述了国内外硫酸盐废水生物处理工艺的沿革和最新进展。20 世纪 90 年代前国际上大多采用单相厌氧工艺处理硫酸盐废水,但常常运转失败。多数研究针对此问题,探讨硫酸盐还原菌(SRB)对产甲烷菌(MPB)和其他厌氧微生物的初级抑制作用和次级抑制作用机制以及改进措施。90 年代以后,国内外开发出多种硫酸盐废水生物处理新工艺,重点介绍了单相吹脱工艺、硫酸盐还原与硫化物光合氧化联用工艺、硫酸盐还原与硫化物化学沉淀联用工艺、生物膜法工艺、两相厌氧工艺、两相厌氧与硫化物生物氧化联用工艺等。简述了每种工艺的要点和研究成果。同时,提出了进一步提高硫酸盐废水处理工艺效能的要点。

关键词: 硫酸盐废水;硫酸盐还原菌(SRB);产甲烷菌(MPB)

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2004)11-1446-04

Bio-treatment of sulfate-laden waste water

WANG Ai-jie¹, WANG Li-yan², REN Nan-qi¹, DU Da-zhong¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, E-mail: waj0578@hit.edu.cn; 2. Dept. of Chemistry, Harbin College, Harbin 150086, China)

Abstract: The evolution and the latest development of the sulfate wastewater's biological treatment technics at home and abroad were summarized. Before 1990s the single-phase anaerobic technics was widely used in treating sulfate wastewater in the world, but the treatment always run unsuccessfully. The mechanism of the primary and sub inhibitive effect on methane-producing bacteria and other anaerobic microorganisms caused by sulfate-reducing bacteria was discussed in most studies and the improving measures were discussed too. After 1990s, kinds of new technics of biologically treating sulfate wastewater were developed. The following processes such as single-phase anaerobic reactor plus gas-lift process, sulfate-reduction plus sulfide photosynthesis oxidation process, sulfate-reduction plus sulfide chemical precipitation process, bio-film process, two-phase anaerobic process, two-phase anaerobic process plus sulfide bio-oxidation process etc. were emphatically introduced and the key points and experimental results of each process were briefly introduced. The points of further improving the efficiency of bio-treatment of sulfate-laden wastewater were given at the same time.

Key words: sulfate wastewater; sulfate-reducing bacteria (SRB); methane-producing bacteria (MPB)

随着工业的发展,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硫酸盐工业废水。硫酸盐本身虽然无害,但是它遇到厌氧环境会在硫酸盐还原菌

(SRB)作用下产生 H_2S , H_2S 能严重腐蚀处理设施和排水管道,且气味恶臭,严重污染大气。硫酸盐废水排入水体会使受纳水体酸化, pH 值降低,危害水生生物;排入农田会破坏土壤结构、使土壤板结,减少农作物产量及降低农产品品质。目前,我国很多城市的地下水已经受到不同程度的硫酸盐污染。寻求行之有效的硫酸盐废水处理工艺早已成为环境工程界普遍关注的问题。早在 1988 年第五届国际厌氧消化会议和 1991 年国际水污染

收稿日期: 2003-12-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50208006); 哈尔滨工业大学科学研究基金资助项目(HIT. 2001. 51).

作者简介: 王爱杰(1972-),女,博士,副教授;

任南琪(1959-),男,博士,教授,博士生导师,特聘教授。

研究及控制协会东京会议上,曾两次将硫酸盐废水治理工艺作为专题研讨。

自 20 世纪 70 年代起国外开始采用单相厌氧工艺处理高浓度硫酸盐废水。但是,反应器运转成功的实例很少。

1 传统单相厌氧工艺的弊端

Anderson^[1]将传统的单相厌氧工艺中硫酸盐还原作用对厌氧消化的影响机制归纳为两个方

面,一是由于 SRB 与产甲烷菌(MPB)竞争共同底物(乙酸和 H₂)而对其产生的初级抑制作用;二是由于硫酸盐的还原产生的 H₂S 对 MPB 和其他厌氧菌的次级抑制作用。同时,H₂S 对沼气的产量和利用也造成严重影响。表 1 列出了几种废水处理的运行结果。可见,有硫酸盐存在时,就产甲烷速率与产 H₂S 速率的对比而言,H₂S 的产生速率几乎都超过了产甲烷的速率,甚至造成了无甲烷产生的现象。

表 1 单相厌氧工艺处理高浓度硫酸盐废水的若干运行结果

反应器	接种污泥	污泥形式	基质	$\frac{r_{\text{COD}}}{r_{\text{H}_2\text{S}}}$	$\frac{r_{\text{CH}_4}}{r_{\text{H}_2\text{S}}}$
CSTR(6.0 L)	消化污泥	絮状	乙酸 + SO ₄ ²⁻	1.0	0.0
CSTR(12.0 L)	未报告	絮状	城市污水 + SO ₄ ²⁻	1 ~ 1.3	0.0
UASB(6.0 L)	未报告	颗粒污泥	模拟城市污水 + SO ₄ ²⁻	1.8	约 0.4
UASB(2.5 L)	絮体污泥	颗粒污泥	酵母废水 + SO ₄ ²⁻	3.0	约 0.6
CP(0.5 m ³)	消化污泥	絮状	食用油废水(含 SO ₄ ²⁻)	1.5	约 0.8
AF(0.5 m ³)	消化污泥	生物膜,絮状	脂肪酸废水(含 SO ₄ ²⁻)	1.8	约 0.7
AF(1.5 L)	好氧活性污泥	生物膜,絮状	糖蜜废水 + SO ₄ ²⁻	3.5	约 0.3
FB(3.2 L)	厌氧生物膜	生物膜	乙酸 + SO ₄ ²⁻	1.6	约 0.5
FB(3.2 L)	厌氧生物膜	生物膜	乙酸 + SO ₄ ²⁻	-	约 0.9
UASB(2.5 L)	颗粒污泥	颗粒污泥	甘油、类脂 + SO ₄ ²⁻	2.0	约 0.1
UASB(20.0 m ³)	颗粒污泥	颗粒污泥	食用油废水(含 SO ₄ ²⁻)	1.5	约 0.5

1) CSTR 为完全混合反应器;CP 为厌氧接触反应器;UASB 为升流式厌氧污泥床反应器;AF 为厌氧滤池;FB 为厌氧流化床反应器;

2) r_{COD} , r_{CH_4} , $r_{\text{H}_2\text{S}}$ 分别为 COD 去除速率、产甲烷速率和产 H₂S 速率。

继 Anderson 之后,很多学者提出了上述两种抑制作用的关键影响因素和控制措施,简述如下。

1.1 SRB 对 MPB 初级抑制作用的相关研究

Nielson 等^[2]提出了 SRB 和 MPB 竞争底物的动力学特性和相关机制。Chio 等^[3]发现高温(55 ~ 65)SRB 比 MPB 更有竞争 H₂ 和乙酸的优势。Saleh 等^[4]提出硒酸盐、钼酸盐、Na₂AsS₄、K₂CrO₄、PbCl₂、CdCl₂、Na₂MnO₄、超声波、可见光、紫外线可以作为 SRB 的抑制剂(物)并解释其作用机制。Alphenaar 等^[4]研究细胞固定化形式和基质浓度与 SRB 在竞争中占优势的关系,提出底物浓度较低时,SRB 易在生物膜上占绝对优势。Viss-er^[4]提出较高 pH 下,SRB 获得底物的能力强,而在中性 pH 时,MPB 的竞争可占优势。

Lens^[5]等发现硫酸盐浓度对 SRB 和 MPB 生长速率比值的影响规律。McCartney^[6]等提出了碳硫比(基质浓度与硫酸盐浓度之比,TOC/ SO₄²⁻ 或 COD/ SO₄²⁻)是决定 SRB 和 MPB 竞争的重要因素,并探讨其作用范围。他们研究了接种污泥的类型和驯化方式,提出在高硫酸盐浓度废水中驯化污泥有利于 SRB 占优势,反之 MPB 占优势。

1.2 SRB 对 MPB 次级抑制作用的相关研究

Khan^[7]等发现硫化物的毒性远远大于其他化

合态硫,不溶性硫化物对厌氧过程一般无抑制作用。Reise^[8]等提出硫化物对微生物的抑制作用主要是溶解性 H₂S。Koster 等提出可以控制 pH 值从而抑制 H₂S 的毒性,给出了硫化物的最高抑制阈。针对单相厌氧工艺中 SRB 还原硫酸盐所产生的不利影响,很多研究者自 20 世纪 90 年代起提出多种改进工艺处理含高浓度硫酸盐废水。

2 硫酸盐废水处理新工艺研究

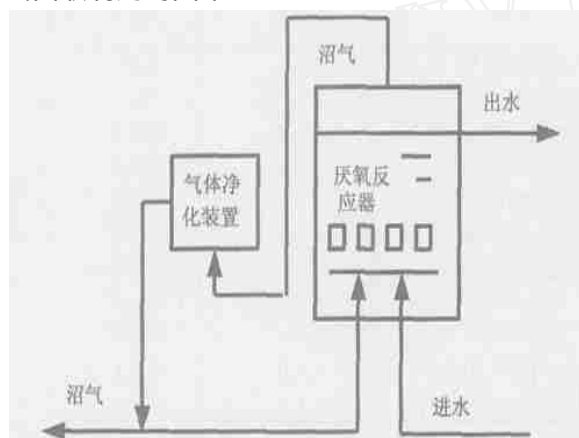
2.1 单相吹脱工艺

单相吹脱工艺是在单相厌氧处理系统中安装惰性气体吹脱装置,将硫化氢不断地从反应器中吹脱掉,以减轻其对 MPB 和其他厌氧菌的抑制作用,从而改善反应器的运行性能。吹脱工艺见图 1。

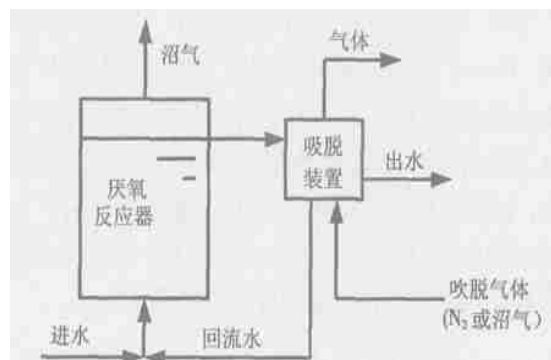
Olesakjewicz^[10]采用 UASB 反应器设内部吹脱装置(如图 1(a)所示)处理乳清废水,发现系统的 COD 去除率和产甲烷率提高 30 %以上。他在处理纸浆废水时,采用装有气体循环净化装置的厌氧反应器,进水 COD、BOD、SO₄²⁻ 分别为 12 000、4 000 ~ 6 000 和 3 000 mg/L,将所产生的沼气经净化(用加有一种螯合剂的高价铁溶液洗涤)后回流到反应器来吹脱 H₂S,反应器的 COD 和 BOD 去除率分别可达 54 %和 88 %。吹脱气体一般采用较稳

定的 N_2 气或沼气. 内部吹脱的单相厌氧工艺的最大缺点是吹脱气量不易控制, 维持吹脱装置正常工作有一定困难. Anderson^[1]开发的外部吹脱装置(如图 1(b)所示)操作较简单, 只对出水进行吹脱, 去除 H_2S 后将部分处理水回流, 对进水进行稀释.

应该指出, 单相吹脱厌氧工艺并没有彻底克服硫酸盐还原作用对 MPB 的抑制作用, 因为反应器中仍然有相当量的 H_2S 存在, 会对 MPB 产生抑制作用, 在一定程度上降低甲烷产量, 而且增加沼气回收利用的困难.



(a) 内部吹脱的单相厌氧反应器



(b) 外部吹脱的单相厌氧反应器

图 1 单相吹脱工艺流程图

2.2 硫酸盐还原与硫化物光合氧化联用工艺

Buisman 等^[11]提出一种厌氧工艺, 利用 SRB 将硫酸盐还原为硫化物, 同时利用光合细菌将硫化物氧化为单质硫. Kobayashi 等人^[12]通过小试用厌氧光合菌实现了由硫化物到单质硫的转化. Maree^[13]通过在厌氧反应器培养光合菌来处理高浓度硫酸盐废水, 在厌氧滤池中成功地实现了硫酸盐 $\rightarrow$ 硫化物 $\rightarrow$ 硫的转化. 当废水的 COD 为 3 000 mg/L, SO_4^{2-} 为 2 500 mg/L, 反应器的 HRT 为 12 h 时, 硫酸盐还原率达 90% 左右, COD 去除率达 70%. 这种方法在处理硫酸盐废水方面虽有一定的效果, 但需要在反应器内部提供光照, 要消耗辐射能, 这在经济上有严重的缺点^[13]. 另外, 有关光合细菌法处理硫酸盐废水的研究大都处在

小试阶段, 在工程实践中应用的可能性不大.

2.3 硫酸盐还原与硫化物化学氧化联用工艺

由于硫化物与某些金属离子易生成沉淀, 在反应器中投加 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 等, 可以降低溶解性硫化物浓度, 减小硫化物对 MPB 的毒害作用^[14]. 但是, 此工艺的弊端是投加金属盐后形成的不溶性硫化物在反应器中会累积, 从而降低厌氧污泥的相对活性. 而且, 当硫酸盐浓度很高时, 所需的化学药品的费用会相对增高. 另外, 污泥产量也会增加, 给污泥后处理带来困难. 这种方法虽然控制了硫化物的抑制, 但 SRB 与 MPB 的基质竞争作用依然存在, 产甲烷率仍偏低.

2.4 生物膜法工艺

Renze^[15]指出, 由于 SRB 的世代时间通常大于 HRT, 故采用生物膜工艺处理硫酸盐废水较有优势. 填充有载体介质(如白云石)的生物膜反应器比完全混合生物反应器更适用于工业. 但是, 固定载体、固定生物膜反应器的主要缺点是在反应器内容易形成孔隙通道, 载体易被硫化物沉淀所阻滞. Maree^[16]等认为, 这一问题可通过采用周期性地急剧提高回流速度来解决. 另一方法是采用流动载体. Vladislav 和 Sava^[17]以铁屑作为生物膜的载体, 对填充床和流动床生物反应器进行了小试研究. 结果表明, 流动床生物反应器中 SO_4^{2-} 的最大还原能力 (7.97 kg/(m³·d)) 比填充床 (3.45 kg/(m³·d)) 高 2 倍. Jukka^[18]在 UASB 反应器中以乙醇作为碳源, 考察 SO_4^{2-} 还原情况. 结果表明, 当 SO_4^{2-} 负荷率为 6.0 kg/(m³·d), HRT 为 0.5 ~ 0.85 d, 进水 SO_4^{2-} 质量浓度为 840 ~ 5 000 mg/L 时, SO_4^{2-} 去除率达到 80%. 大多数研究者认为采用具有出水回流的上向流填充床反应器为宜, 可以实现进水和反应器内液体的完全混合.

2.5 两相厌氧工艺

Mizuno^[19]等的试验证明两相厌氧工艺的酸化单元中微生物的产酸作用和硫酸盐还原作用可以同时进行. 指出在酸性发酵阶段利用 SRB 去除硫酸盐具有以下优点: 1) 硫酸盐还原菌可以代谢酸性发酵阶段的中间产物如乳酸、丙酮酸、丙酸等, 故在一定程度上可以促进有机物的产酸分解过程; 2) 发酵性细菌比 MPB 所能承受的硫化物浓度高, 所以, 硫化物对发酵性细菌的毒性小, 不致影响产酸过程; 3) 由于硫酸盐还原作用主要是在产酸相反应器中进行, 避免了 SRB 和 MPB 之间的基质竞争问题, 可以保证产甲烷相有较高的甲烷产率, 而且在形成的沼气中的 H_2S 含量较小, 便于利用; 4) 由于产酸相反应器处于弱酸状态, 硫酸盐的

还原产物硫化物大部分以 H_2S 的形式存在,便于吹脱去除。

Mizuno 等用厌氧滤池作为两相厌氧工艺的产酸相反应器,用 UASB 反应器作为产甲烷相反应器处理纸浆废液,进水 COD 为 19 300 mg/L, BOD 为 5 930 mg/L, SO_4^{2-} 为 5 225 mg/L, pH 为 6.0~6.3 时, SO_4^{2-} 的还原率可达 63%, 系统的 COD 去除率达 90% 以上。Gao^[20] 利用 CSTR 型两相厌氧工艺处理含乳清的硫酸盐废水,产酸相反应器进水 COD 为 8 500 mg/L, SO_4^{2-} 为 1 000 mg/L, pH 为 6.1~6.2 时,硫酸盐还原率可达 88%, 工艺系统的 COD 去除率达 95% 以上,产甲烷相中的产甲烷率达 0.31~0.40 $\text{m}^3/\text{kg COD}(30^\circ\text{C})$ 。王爱杰等^[21] 采用 CSTR 型产酸脱硫反应器作为两相厌氧工艺系统的产酸相处理高浓度含硫酸盐废水,进水 COD 质量浓度为 3 000~4 000 mg/L, SO_4^{2-} 质量浓度为 1 000~2 000 mg/L, SO_4^{2-} 负荷率低于 7.5 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, HRT 为 4.8~6.0 hr, pH 为 6.0~6.2 时, SO_4^{2-} 的还原率可达 90%~100%。同时,通过连续流试验和间歇试验,考察 SRB 的群体生态学规律,并发现了硫酸盐还原过程中微生物的特殊代谢类型——乙酸型代谢方式^[22]。王旭等^[23] 提出,在处理需要外加碳源的无机硫酸盐废水(如酸矿废水)时,为降低成本,提高处理效率,应尽量降低废水的碳硫比至理论值 0.67,其途径是在反应器中培育完全氧化型 SRB。他采用 CSTR 型产酸脱硫反应器驯化完全氧化型 SRB,以乙酸为底物,进水不调节碱度,硫酸盐和 COD 去除率都可达到 80%。

2.6 两相厌氧与硫化物生物氧化联用工艺

目前,两相厌氧工艺处理硫酸盐废水已得到诸多共识,并在此基础上发展了一些更理想的工艺系统。杨景亮和左剑恶等^[24]、李亚新等^[25] 和王爱杰等^[26] 分别提出了“硫酸盐还原—硫化物生物氧化—产甲烷”新工艺。其中硫化物氧化单元是利用无色硫细菌 (*Thiobacillus*) 将硫化物氧化为单质硫,从而彻底去除系统中的硫酸盐。此生物脱硫工艺条件温和,能耗低,投资少,具有广阔的应用前景。王爱杰等^[27] 针对制药、垃圾渗滤液等富含硫酸盐的废水中同时含有硝酸盐或氨氮的特点,提出硫化物氧化单元可以利用脱氮硫杆菌 (*Thiobacillus denitrificans*) 同步脱氮脱硫的功能,实现废水在厌氧膨胀床反应器中同步脱氮脱硫的目的,并收获为单质硫。

3 提高硫酸盐废水处理工艺效能

1) SRB 与某些产酸菌是底物利用关系,控制产酸相反应器向 SRB 容易利用的底物转化,是加快硫酸盐还原速率和提高硫酸盐去除率重要环节。

2) 硫酸盐完全还原时碳硫比的理论值为 0.67,只有底物被完全氧化为二氧化碳或水时碳硫比才能接近 0.67,不完全氧化时(即氧化产物为乙酸时)碳硫比多 > 1.5。因此,降低碳硫比的关键是控制条件来增加 SRB 对乙酸的利用,这对于处理酸矿废水尤为重要。

3) 接种污泥中 SRB 的优势地位可保证工艺系统在相当长时间内稳定运行。SRB 初始优势有两层含义:一是指 SRB 对非 SRB 的优势,二是指不同 SRB 种群(如利用醇类底物的 SRB 与利用乙酸底物的 SRB)之间的初始优势关系。后者对于降低碳硫比尤为重要。

4) 研究 SRB 和其他微生物的生理生态学规律有助于确定最佳工艺参数,如 COD/ SO_4^{2-} 比、pH 值、氧化还原电位、碱度等,解释特殊的反应现象,寻求进一步提高处理效率和能力的手段。

5) 生物膜法能有效增加 SRB 在反应器中的停留时间,增大 SRB 浓度,提高硫酸盐还原率。

6) 对于不同种类硫酸盐废水,根据有机物特点、碳硫比和治理目标等有针对性选择处理工艺。

参考文献:

- [1] ANDERSON G K. Fate of COD in an anaerobic system treating high sulfate bearing wastewater [A]. Int Conf on Toxic Waste Treatment [C]. Washington D C: [s. n.], 1986.
- [2] NIELSON P H. Biofilm dynamics and kinetics during high-rate sulfate reduction under anaerobic conditions [J]. Appl Environ Microbiol, 1987, 53: 27 - 32.
- [3] CHIO E, RIM J M. Competition and inhibition of sulfate reducers and methane producers in anaerobic treatment [J]. Wat Sci Technol, 1991, 23: 1259 - 1264.
- [4] POSTGATE J R. The Sulfate Reducing Bacteria [M]. UK: Cambridge University Press, 1984.
- [5] LENS P, MATTER O. Removal in Gradient Biofilm Reactor [D]. Belgium: University of Gent, 1994.
- [6] McCARTNEY D M, OLESKIEWICZ J A. Competition between methanogens and sulfate reducers: Effect of COD: sulfate ratio and acclimatization [J]. Wat Env Res, 1993, 65 (1): 655 - 664.
- [7] KHAN A W, TROTTIER T M. Effect of sulfur containing compounds on anaerobic degradation of cellulose to methane by mixed cultures obtained from sewage sludge [J]. Appl Environ Microbiol, 1978, 35: 1027 - 1034.

(下转第 1501 页)

所得的结果。所用材料是实验室自行研制的材料 1 和材料 2,厚度均为 0.5 mm,Salisbury 屏的阻抗取为 1 000 Ω 。

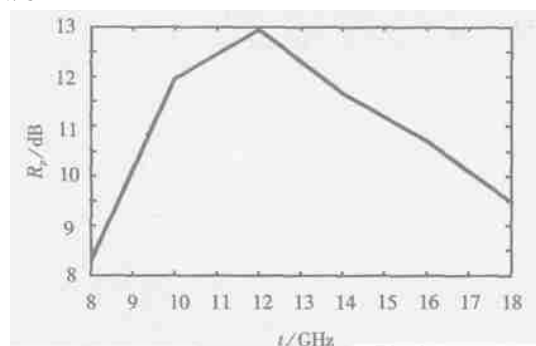


图 4 厚度均为 0.5 mm, Salisbury 屏的阻抗为 1 000 Ω 时的 $R_p - f$ 曲线

5 结 论

1) 推导出了用多层平板吸波材料优化 Salisbury 屏的反射系数公式,并以两层平板吸波材料作为隔离层对 Salisbury 屏进行了具体的优化设计。

2) 本设计不仅降低了 Salisbury 屏的厚度,而且保证了在 8~18 GHz 内有较大的 dB 值,说明本文的优化设计是合理的。

参考文献:

- [1] CHAMBERS B. Optimum Design of a Salisbury Screen Radar Absorber[J]. Electronics Letters, 1994, 30 (16): 1353 - 1354.
- [2] RONALD, L. FANTE, FELLOW. Reflection Properties of the Salisbury Screen [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(10): 1443 - 1454.
- [3] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [4] 崔东辉,朱绪宝. 雷达吸波材料发展趋势[J]. 飞航导弹, 2000, (11): 54 - 57.
- [5] 王自荣,余文彬. 雷达隐身技术概述[J]. 上海航天, 1999, (3): 52 - 56.
- [6] 赵九蓬,李喜,吴佩莲. 新型吸波材料研究动态[J]. 材料科学与工艺, 2002, (2): 219 - 224.
- [7] 布列霍夫斯基赫. 分层介质中的波[M]. 北京:科学技术出版社,1960. (编辑 杨 波)

(上接第 1449 页)

- [8] REISE M A M. Effect of hydrogen sulfide on growth of sulfate reducing bacteria [J]. Biotech Bioeng, 1992, 40 (5): 593 - 600.
- [9] KOSTER I W. Sulfide inhibition of the methanogenic activity of granular sludge at various pH - levels [J]. Water Res, 1986, 20(12): 1561 - 1567.
- [10] OLESZKIEWICZ J A. Anaerobic treatment of high sulfate wastewater[J]. Water Res, 1986, 13: 423 - 428.
- [11] BUISMAN C T, LETTINGA G. A new biotechnological process for sulphide removal with sulphur production[A]. Fifth International Symposium on Anaerobic Digestion (Poster Papers) [C]. Bologna: [s. n.], 1988, 9 - 22.
- [12] KOBAYASHI H A. Use of photosynthetic bacteria for hydrogen sulphide removal from anaerobic waste treatment effluent [J]. Water Res, 1983, 17(5): 473 - 497.
- [13] MAREE J P, STRYDOM W F. Biological sulphate removal in an upflow packed bed reactor[J]. Water Res, 1985, 19 (9): 1101 - 1106.
- [14] WOLIN M J, MILLER T L. Mblbdate and sulfide inhibit H_2 and increase formate production from glucose by rumiococcus albus [J]. Arch Microbiol, 1980, 124: 137 - 142.
- [15] RENZE T. Biological sulphate reduction using gas - lift reactor fed with hydrogen and carbon dioxide as energy and carbon source[J]. Biotech Bioeng, 1994, 44 (5): 586 - 594.
- [16] MAREE J P, STRYDOM W F. Biological sulphate removal from industrial effluents in an upflow packed bed reactor [J]. Wat Res, 1987, 21(2): 141 - 146.
- [17] VLADISLAV S, SAVA T. Application of fluidized carrier to bacterial sulphate reduction in industrial wastewaters purification[J]. Biotechnology Techniques, 1992, 6 (1): 91 - 96.
- [18] JUKKA A. Sulphate reduction on acetate in thermophilic upflow anaerobic sludge bed reactor at 55 and 70 [J]. Proc 8th International Conf. on Anearobic Digestion, 1997, 3: 25 - 29.
- [19] MIZUNO O, NOIKE T. The behavior of sulfate-reducing bacteria in acidogenic phase of anaerobic digestion[J]. Wat Res, 1998, 32 (5): 1626 - 1634.
- [20] GAO Y. Anaerobic Digestion of High Strength Wastewaters containing High Levels of sulphate[D]. England: Univ. of Newcastle upon Tyne, 1989.
- [21] 王爱杰,任南琪. 产酸脱硫反应器 SRB 种群的功能与地位[J]. 中国环境科学, 2001, 21(2): 119 - 123.
- [22] 王爱杰,任南琪. 硫酸盐还原过程中乙酸型代谢方式的形成及其稳定性[J]. 环境科学, 2004, 25 (1): 75 - 79.
- [23] 王 旭. 产酸脱硫生物膜反应器处理硫酸盐废水特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2003.
- [24] 杨景亮,左剑恶. 两相厌氧工艺处理硫酸盐有机废水的研究[J]. 环境科学, 1995, 6 (3): 8 - 11.
- [25] 李亚新,苏冰琴. 硫酸盐还原菌和酸矿废水生物处理技术[J]. 环境污染控制技术, 2000, 1 (5): 1 - 11.
- [26] 任南琪,王爱杰. 硫化物氧化及新工艺[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(3): 265 - 268. (编辑 刘 彤,姚向红)