

两级 UASB 与好氧组合工艺处理城市生活垃圾渗滤液的启动研究

郑淑文 王淑莹* 张树军 彭永臻

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022)

摘 要 采用两级 UASB 与好氧组合工艺处理早期城市生活垃圾渗滤液。系统出水按不同比例回流到一级 UASB 中进行反硝化, 同时进行产甲烷反应, 有机物在二级 UASB 中被进一步降解, 好氧池完成剩余有机物的去除和氮氮的硝化。启动阶段通过对原渗滤液不同比例的稀释, 分 5 次逐步提高进水浓度, 启动结束时完成了对原渗滤液的高效处理。在进水 COD 浓度从 3000 mg/L 提高到 15 000 mg/L, 氨氮浓度从 250 mg/L 提高到 1400 mg/L 时, 最终 COD 去除率稳定在 92% 左右, 氨氮去除率可达 99% 以上, 一级 UASB 中反硝化率接近 100%, 回流比为 300% 时系统总氮去除率为 70% ~ 80%。

关键词 垃圾渗滤液 两级 UASB 好氧 同步反硝化产甲烷 启动

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1008-9241(2006)10-0088-05

Start up of two-stage up-flow anaerobic sludge blanket and aerobic reactor in treating municipal landfill leachate

Zheng Shuwen Wang Shuying Zhang Shujun Peng Yongzhen

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract A two stage up-flow anaerobic sludge blanket (UASB)-aerobic system was used to treat leachate from a immature landfill. Different proportion effluent of this system was recycled to the first UASB where simultaneous denitrification and methanogenesis were carried out. Organic substance was further removed in the second UASB and aerobic reactor accomplished residual COD removal and nitrification. Raw leachate was diluted with tap water in different proportions and the influent was increased by five phases, high-rate removal of COD was achieved when start up finished. When COD concentration was from 3000 mg/L to 15 000 mg/L, COD removal efficiency can be maintained around 92%. When $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration was from 250 mg/L to 1400 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal efficiency was kept above 99%, denitrification efficiency was nearly 100%, total nitrogen removal efficiency was 70% ~ 80% when recycle ration was 300%.

Key words landfill leachate; two stage UASB; aerobic; simultaneous denitrification and methanogenesis; start up

城市生活垃圾渗滤液是生活垃圾在填埋场内经过物理、化学和生物降解作用, 使垃圾中原有的水分, 垃圾降解过程产生的水分和渗入的雨水、地下水透过垃圾层渗沥出来的污水。渗滤液具有有机物成分复杂、浓度高; 氨氮浓度高; 磷元素缺乏, 营养物质比例失调; 水质随季节, 填埋年限等因素复杂多变等特点^[1]。目前还没有一种完整的经济有效的处理工艺, 国内外采用的处理技术主要有物理化学法、好氧生物处理法、厌氧生物处理法以及各种处理方法的联用。物理化学法主要作为预处理和后处理, 生物处理工艺因其处理效果稳定, 成本相对较低往往被用作主处理工艺, 因此垃圾渗滤液的生化处理技

术仍是国内外的研究重点之一。Timur 等^[2]采用间歇式厌氧反应器与厌氧流化床反应器, TOC 去除率分别达到 73.9% 和 81.4%; Kennedy 等^[3]采用间歇和连续进水的升流式厌氧污泥床反应器 (up-flow anaerobic sludge blanket, UASB), 在高有机负荷下

资助项目: 北京市属市管高等学校人才强教“创新团队”资助项目;
北京市科委国际合作项目

收稿日期: 2005-09-12; 修订日期: 2006-02-16

作者简介: 郑淑文 (1981~), 女, 硕士研究生, 主要从事水污染控制方面的研究。

E-mail: zhengshuwen2003@emails.bjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wsy@bjnt.edu.cn

连续进水反应器在有机物去除率和稳定性方面要好于间歇进水反应器;Osman Nuri Agdag^[4]采用两级 UASB 与完全混合好氧反应器取得了 80% 的 COD 去除率和 99.6% 的硝化率;Jeong Hoon Im 等^[5]采用 UASB 与好氧组合处理工艺,好氧出水回流到 UASB 同时发生厌氧和反硝化反应,厌氧反应器中最大 COD 去除速率与好氧反应器中最大氨氮去除速率分别为 $15.2 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ 和 $0.84 \text{ kg NH}_4^+-\text{N/m}^3 \cdot \text{d}$ 。本试验采用两级 UASB 与好氧组合工艺处理城市生活垃圾渗滤液,对其快速启动进行了较为充分的研究并取得了很高的处理效率,本文提供了启动方法和试验数据。

1 试验材料与方法

1.1 接种污泥与水质

厌氧反应器的接种污泥为北京某啤酒厂厌氧反应器中的颗粒污泥,污泥呈深黑色,沉降性能良好;好氧反应器内接种污泥取自本试验室处理生活污水的好氧反应器。

试验用水取自北京市六里屯垃圾填埋场的调节池,每月取水一次,室温下保存。六里屯垃圾填埋场正在运行中,填埋年限为 5 年,其渗滤液呈深黑色,粘稠,有恶臭,属典型早期渗滤液。其 3~4 月份水质如下:COD $10\,000 \sim 20\,000 \text{ mg/L}$,氨氮 $1000 \sim 2000 \text{ mg/L}$,SS $500 \sim 1000 \text{ mg/L}$,pH 值 7~8,碱度 $8000 \sim 11\,000 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$,其 BOD/COD 值在 0.5 左右,可生化性较好,氨氮含量较高,但重金属含量相对较低。

1.2 分析方法

每周取样分析 4~5 次,各指标均按照标准方法测定,具体为:化学需氧量(COD),COD 快速测定仪;氨氮,纳氏试剂光度法;亚硝酸盐氮,N-(1-萘基)-乙二胺光度法;硝酸盐氮,麝香草酚法;磷,氯化亚锡还原光度法;碱度,电位滴定法;重金属,伏安极谱仪;温度、DO、pH 等采用在线测量(WTW DO 330 i,WTW pH 330 i);气体计量采用液体置换法。

1.3 试验流程与设备

本试验采用两级 UASB(以下简称 UASB1 与 UASB2)反应器与多段好氧反应器串联运行,试验流程如图 1 所示。

一体化水箱为同心圆柱形,外箱被分为 2 部分,分别装原水与系统出水,中间水箱用加热棒加热。UASB1 内径 5 cm,高 200 cm,有效容积 4.25 L。UASB2 内径 8 cm,高 190 cm,有效容积 8.25 L。好氧反应器长 50 cm、宽 12 cm、高 35 cm,有效容积 15

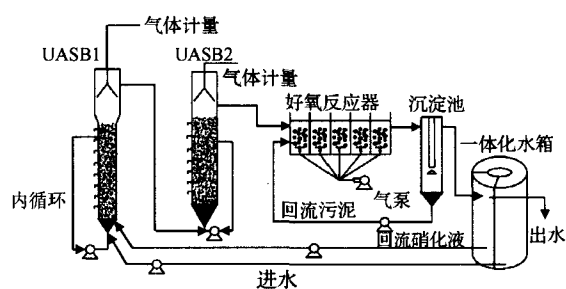


图 1 两级 UASB-好氧系统流程图

Fig. 1 Flow diagram of two-stage UASB-aerobic system

L,反应器由隔板分为 10 个格室,各格室间由隔板上的上下交错圆孔相通,好氧池进水依次流过 10 个格室形成良好推流。沉淀池为竖流沉淀池,直径 10 cm、高 72 cm。4 个反应器均由有机玻璃加工而成,一体化水箱由不锈钢制作。系统出水回流至 UASB1 中。沉淀池污泥回流到好氧反应器的首端。2 个 UASB 反应器均设内循环系统,目的是保证上升流速使泥水充分混合。UASB1 和 UASB2 外缠电加热丝加热。

2 结果与分析

由于厌氧污泥取自处理啤酒废水的 UASB 反应器,因此启动初期将渗滤液与自来水按照 1:8 的比例稀释至接近啤酒废水的浓度(3000 mg/L 左右)。Hickey 等^[6]、Letting G. 等^[7]、Driessen 等^[8]研究也表明 UASB 在启动时 COD 浓度以 4000 mg/L 以下为宜。试验证明以此浓度启动可以使厌氧污泥很快适应渗滤液水质,第 3 d 即观察到 2 个 UASB 有气泡产生,此后每周提高一次进水浓度,5 周后开始加入原渗滤液完成反应器的启动。试验期间温度控制如下:水箱预热温度 41°C ,UASB1 温度 30°C ,UASB2 温度 35°C ,好氧反应器为常温。好氧池溶解氧浓度在 2 mg/L 以上,为有机物降解和硝化提供充足溶解氧。具体启动参数如表 1 所示。

启动时期主要考察系统对 COD、氨氮的去除效果和反硝化效果,在某一负荷范围时,如 COD、 NH_4^+-N 、总氮去除率达到较高水平时,逐步加大处理负荷,待完全处理原渗滤液时认为系统启动成功。

2.1 COD 去除效果

对 COD 的去除效果如图 2 所示。UASB 有机负荷操作控制的条件为:COD 去除率大于 80%,稳定运行 4~6 d 后再提高负荷^[10]。如图 2 所示每周提高一次进水负荷,经过 2 d 驯化,COD 在两级 UASB 中很快就会达到稳定的去除效果,这一方面由于进水浓度提高的同时增大总回流比,对进水起到了一

表1 启动期间参数变化
Table 1 Parameters variation during start-up of the system

项 目	第1周	第2周	第3周	第4,5周
进水流量(L/d)	11	11	5.5	5.5
进水 COD(mg/L)	3000 ~ 3300	4100 ~ 4400	10 000 ~ 12 000	12 000 ~ 17 000
进水氨氮浓度(mg/L)	250 ~ 350	380 ~ 520	820 ~ 920	1100 ~ 1400
总回流比(好氧硝化液回流比)(%)	25	50	100	200
UASB1COD 负荷(kg COD/m ³ ·d)	8.07	10.96	15.29	16.83
不计总回流 UASB1 HRT(h)	9.27	9.27	18.54	18.54
计总回流 UASB1 HRT(h)	7.14	6.18	9.27	6.18
UASB2COD 负荷(kg COD/m ³ ·d)	2.18	3.22	3.39	6.56
不计总回流 UASB2 HRT(h)	18	18	36	36
计总回流 UASB2 HRT(h)	14.4	12	18	12
好氧池氨氮负荷(kg NH ₄ ⁺ -N/m ³ ·d)	0.22	0.33	0.32	0.44
不计总回流好氧池 HRT(d)	1.36	1.36	2.73	2.73
计总回流好氧池 HRT(d)	1.09	0.9	1.36	0.9
好氧污泥回流比(%)	100	100	100	100

定的稀释作用,另一方面 UASB 抗冲击负荷能力较强。当进水从 3000 mg/L 逐步提高到 17 000 mg/L 时,两级 UASB 出水在 350 ~ 1200 mg/L,去除率也逐步增高,两级 UASB 后 COD 去除率可达到 85% 以上,高于 Jeng-Hoon Im 80% 的结果^[5],整个启动期间总 COD 去除率稳定在 90% 以上(把系统作为一个整体考虑,总 COD 去除率的计算只考虑原水与最终出水)。如图 2 所示好氧池对 COD 去除的贡献不大,说明两级 UASB 对有机物具有高效降解作用,剩余的 COD 已基本不能被生物利用,这也保证了高浓度 NH₄⁺-N 在好氧池中的高效去除,而 NH₄⁺-N 的高效去除是渗滤液处理的重点和难点。

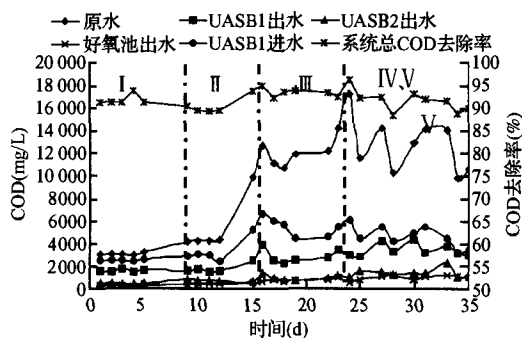


图2 系统 COD 去除情况

Fig. 2 COD removal in the system

2.2 氨氮处理效果

对氨氮的去除效果如图 3 所示。在第 1 周时由于好氧池只启用了 5 个格室,停留时间不足,氨氮的去除率较低,只有 20% 左右。从第 2 周开始加大好

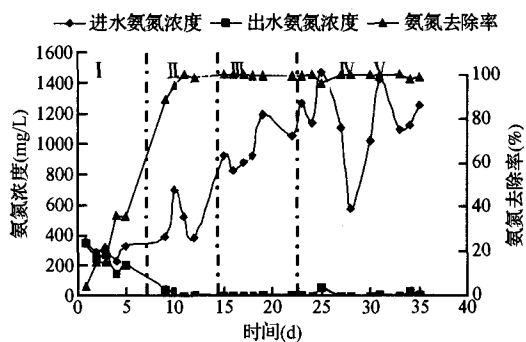
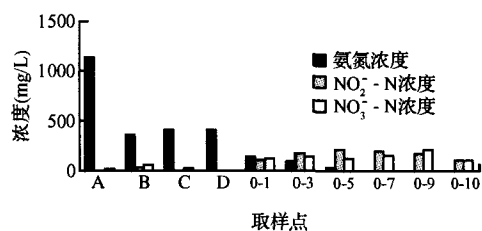


图3 启动期间氨氮去除效果

Fig. 3 Ammonia removal during the start up

氧池停留时间,10 个格室全部启动,硝化效果明显改善,2 d 后即达到 99% 以上,出水氨氮浓度满足渗滤液一级排放标准,达到 10 mg/L 以下。此后逐步提高氨氮负荷,但好氧池硝化效果波动不大,氨氮去除率稳定在 99% 以上。原因如下:一方面经过两级 UASB 后大部分可生化有机物已经被去除,并且随着好氧池中氨氮负荷的增加,可利用 COD/NH₄⁺-N 降低,随时间增长活性污泥中的硝化菌不断增加,在与异氧菌的竞争中占优势^[9]。另一方面,回流稀释了游离氨的浓度,降低甚至消除了其对微生物的抑制作用。以第 4、5 阶段为例,图 4 为第 4、5 周内整个流程典型 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 变化过程。由图 4 可见,尽管进水氨氮高达 1100 mg/L 以上,但由于回流的稀释作用,UASB1 出水氨氮浓度降低到 400 mg/L 以下。由于回流污泥的进一步稀释,好氧池进水氨氮浓度仅为 200 mg/L 左右,这大大减弱了



(A. 原水; B. U1 进水; C. U1 出水; D. U2 出水;
0-1, 0-3, 0-5, 0-7, 0-9, 0-10 表示好氧池各格室)

图 4 系统流程内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化

Fig. 4 Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the system

氨氮对微生物的抑制作用。从图 4 中也可以看出,硝化反应在好氧池的第 7 个格室即基本结束。虽然进水氨氮负荷逐步增加但没有使好氧池超负荷运行,而且渗滤液中碱度充足,为硝化反应提供了必要条件。

2.3 UASB1 中反硝化与同步 COD 去除效果

由于 UASB1 中易生化有机物浓度较高,接种的厌氧颗粒污泥活性较好,所以 UASB1 中厌氧菌很快适应了新的水质。在 UASB 底部溶解性有机物很快转化为短链脂肪酸如乙酸、丙酸,其作为反硝化碳源很容易被反硝化菌利用,因此回流到其中的氧化态氮很快被转化为 N_2 。如图 5 所示随着 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 负荷的增大 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 去除速率亦不断增大,最高去除速率为 $0.83 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ 时, $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 去除率仍接近 100%,出水 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 小于 5 mg/L 。UASB1 中的快速反硝化作用可以从图 6 看出。图 6 为回流比 200% 时 UASB1 内硝酸盐和亚硝酸盐的去除效果。由图 6 可知反硝化在底部很快完成,这也为 COD 在 UASB1 中的进一步降解提供了充足空间。图 7 为整个实验期间的总氮去除情况,总氮浓度提高的同时将总硝化液回流比加大。如上所述由于反硝化完全总氮去除率也稳定增加。在回流比为 200% 时总氮去除率稳定在 70% 左右。由图 2 可以看出回流比增大对 UASB1 的 COD 去除效果影响不大, UASB1 的 COD 去除率始终保持在相对稳定的 30% ~ 40%, 通过实验测定和理论计算可知在 UASB1 中同时发生了反硝化与产甲烷反应,并通过计算 2 种生物反应所消耗的 COD 可以得出,随着 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 负荷的增大,反硝化利用的 COD 与产甲烷所利用的 COD 的比值不断增加,可以认为反硝化较产甲烷反应优先发生。如果进一步增大回流比可使总氮去除率进一步提高,这在以后的试验中得到了证实,进水 COD/N 在 5.0 左右时,回流比增加到 350% 时仍可反硝化完全。

2.4 其他参数的考察

出水挥发酸是 UASB 启动时期最重要的控制参

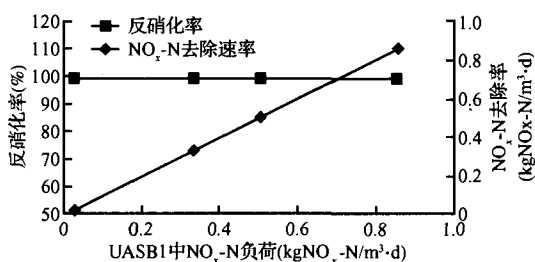
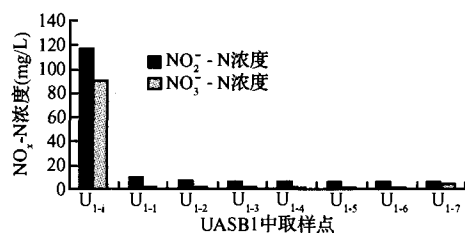


图 5 反硝化速率、反硝化率与 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 负荷之间的关系

Fig. 5 Denitrification rate and efficiency under various $\text{NO}_x^-\text{-N}$ loading rates



($U_{1-1} \sim U_{1-7}$ 为取样口在 UASB1 中 180 cm 的有效高度上由下到上的平均分布)

图 6 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 在 UASB1 中的去除情况

Fig. 6 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ removal in UASB1

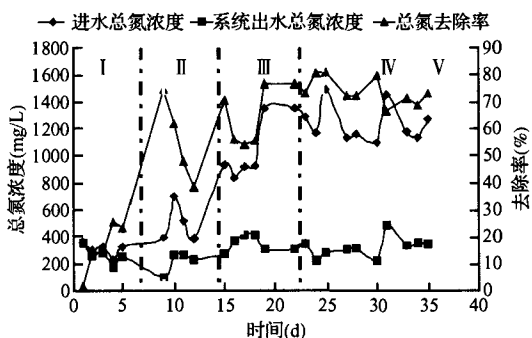
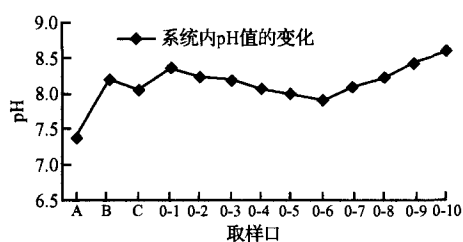


图 7 启动期间系统总氮变化与去除率

Fig. 7 TN variation and removal efficiency during the start up

数之一,而 VFA 与 pH 值有较为直接的关系,可以通过 pH 值间接指示出 VFA 的浓度。有研究表明只要出水 pH 值在 7.15 以上就可以将 VFA 的浓度很好地控制在 400 mg/L 以下^[11]。图 8 为整个试验流程中典型 pH 值变化,可以看出 2 个 UASB 出水 pH 值都在 7.8 以上,提高负荷对 pH 值也没有较大影响,说明反应器提高负荷后并没有超负荷运行,完全没有酸化的危险。

尽管好氧池中主要为硝化反应,硝化菌的比例较高,试验期间二沉池沉淀性能良好,污泥沉降比 SV% 始终维持在 40% 以下,污泥浓度 $4000 \sim 6000$



(A. 原水; B. U1 进水; C. U1 出水;
0-1, 0-2, 0-3, 0-4, 0-5, 0-6,
0-7, 0-8, 0-9, 0-10 表示好氧池各格室)

图8 系统流程内 pH 值变化

Fig. 8 pH variation in the system

mg/L, 污泥指数 SVI 维持在 60 ~ 80 mL/g。

整个系统启动后已运行 5 个月, 效果稳定, 由于氨氮负荷高, 好氧池出现完全的短程硝化, 通过进一步增大总硝化液回流比总氮去除率达到 90% 左右。

2.5 快速启动的影响因素

此厌氧-好氧组合工艺快速启动的影响因素如下:

(1) 启动浓度。因为厌氧反应器的启动往往较慢, 所以采用厌氧-好氧组合处理工艺启动时要优先考虑厌氧工艺, 启动浓度要接近厌氧接种污泥的原处理浓度, 使污泥逐渐适应新的水质, 实验表明渗滤液的启动浓度一般在 3000 ~ 4000 mg/L 为宜。

(2) UASB 上升流速。在启动初期产气量少, UASB 中较大流量的内循环是必要的, 可以确保在 UASB 中达到很好的混合传质效果。

(3) 总硝化液回流比。随着负荷的提高总回流比相应增大, 一方面对进水起到稀释作用, 保证处理负荷提高的幅度不致过大, 加快了启动时间, 同时也提高了反硝化效果, 这是快速启动的重要因素之一。

(4) 接种充足而活性较高的污泥也是快速启动的关键因素。

3 结论

(1) 两级 UASB 与好氧组合处理工艺的抗冲击负荷能力很强, 启动期间 UASB1 COD 负荷从 8.07 上升到 16.83 kg COD/m³ · d, UASB2 COD 负荷从 2.18 上升到 6.56 kg COD/m³ · d, 进水 COD 浓度从 3000 提高到 15 000 mg/L 时, UASB1 的去除率稳定在 40% 左右, UASB2 的去除率稳定在 72% 左右, 完全处理原渗滤液时系统出水 COD 维持在 1000 mg/L 左右, 系统总 COD 去除率达到 90% 以上。

(2) 两级厌氧对有机物的高效去除保证了好氧池硝化反应快速高效进行, 氨氮负荷从 0.22 提高到

0.44 kg NH₄⁺-N/m³ · d 时, 氨氮去除率可达 99% 以上, 出水氨氮小于 10 mg/L。

(3) 好氧出水回流到 UASB1 中, 在回流比从 25% 增加到 200%, NO_x⁻-N 负荷从 0.03 提高到 0.83 kg NO_x⁻-N/m³ · d 时, 反硝化率接近 100%。同时总回流也对进水起到了一定的稀释作用, 保证每次提高进水浓度时系统不致受到过大负荷冲击。

(4) 两级厌氧与好氧工艺可以优势互补, 完成有机物与氨氮的高效去除, 5 周内即完成反应器的启动, 达到经济高效处理高有机物、高氨氮渗滤液的目的。

参考文献

- [1] 沈耀良. 城市垃圾填埋场渗滤液处理技术的研究[博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1999
- [2] Timur H., Öztürk I. Anaerobic treatment of leachate using sequencing batch reactor and hybrid bed filter. Wat. Sci. Technol., 1997, 36(6): 501 ~ 508
- [3] Kennedy K. J., Lentz E. M. Treatment of landfill leachate using sequencing batch and continuous flow up-flow anaerobic sludge blanket reactors. Wat. Res., 2000, 34(14): 3640 ~ 3656
- [4] Osnan Nuri Ağdağ, Delia Teresa Sponza. Anaerobic/aerobic treatment of municipal landfill leachate in sequential two-stage up-flow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)/completely stirred tank reactor (CSTR) systems. Process Biochemistry, 2005, 40: 859 ~ 902
- [5] Jeong Hoon Im, Hae Jin Woo, et al. Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anaerobic-aerobic system. Wat. Res., 2001, 35(10): 2403 ~ 2410
- [6] Hickey R. F., Wu W. M., Veiga M. C., et al. Start-up, operation, monitoring and control of high rate anaerobic treatment systems. Wat. Sci. Technol., 1991, 24(8): 207 ~ 225
- [7] Lettinga G., Hulshoffpol L. W. UASB-process design for various types of wastewater. Wat. Sci. Technol., 1991, 24(8): 87 ~ 107
- [8] Driessn W. J. B. M., Habet L. H. A., et al. New developments in the design of up flow anaerobic sludge bed reactors. Specialized IAWQ Conference on Pretreatment of Industrial Wastewater, 1996
- [9] 高南. 普通活性污泥法脱氮的影响因素. 石化技术, 2004, 11(2): 34 ~ 36
- [10] 吕炳南. 污水生物处理新技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005
- [11] 胡浩元. UASB 反应器处理垃圾渗滤液的快速启动方法. 工业用水与废水, 2002, 33(6): 29 ~ 31