



# 高负荷厌氧生物反应器研究进展及其应用

汤兵,徐锦妙

广东工业大学环境科学与工程学院,广州 510006

**摘要** 概述了厌氧消化的基本原理,包括厌氧消化过程理论与厌氧消化的主要影响因素。简单介绍了厌氧生物反应器的发展历史,重点介绍了典型高负荷厌氧生物反应器(上流式厌氧污泥床,厌氧膨胀颗粒污泥床和内循环式反应器)的特点和运行机制,及其应用情况。通过以上概述指出高负荷厌氧生物反应器存在的问题和缺陷。最后,提出高负荷厌氧生物反应器今后的研究重点应该放在如何提高反应器效率上。

**关键词** 厌氧生物反应器;上流式厌氧污泥床;厌氧膨胀颗粒污泥床;内循环式厌氧反应器

**中图分类号** X703

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.03.13

## Progress and Application of High-load Anaerobic Bioreactor

TANG Bing, XU Jinmiao

Faculty of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

**Abstract** Basic principle of anaerobic digestion is simply reviewed. It includes anaerobic digestion theory and the main influencing factors. The development history of anaerobic digesters is summarized, and the characters, the running mechanisms, and application of some typically high-load reactors, such as Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), anaerobic expanded granular sludge bed and IC anaerobic reactor, are especially introduced. In summing up, the problems and the defects of the high-load anaerobic reactors are put forward. Finally, it is also pointed out that the future study of anaerobic digester should focus on how to raise the reactors' efficiency.

**Keywords** anaerobic bioreactor; upflow anaerobic sludge blanket; anaerobic expanded granular sludge bed; IC anaerobic reactor

### 0 引言

随着城市和工业的迅速发展,产生了大量的生活、工业废水。使用好氧法处理废水耗能大,因此在能源日益短缺的当今世界,寻找低能耗、高处理率的污水处理技术非常必要。厌氧生物处理技术正是在此背景发展起来的。它处理过程中所需能耗低,且能产生沼气等资源,备受关注。

在废水处理过程中会产生大量的污泥。据统计,至2008年3月底,中国污泥年产量已达 $2.66 \times 10^7$ t(含水率80%)<sup>[1]</sup>;根据“十二五”规划,目前全国城镇污水处理设施每年产生污泥2200万t(含水率80%),全国污泥处理率不足10%<sup>[1]</sup>。这些污泥常因得不到正确的处理而演变成固体垃圾。显然,污泥处理已经成为环境领域的一大难题。厌氧消化污泥处理技术,由于具有减容、杀菌、改善泥性、产生再生能源沼气、制备氢气、回收能源等优点,在当今能源危机的形式下更具长远战略意义<sup>[2-3]</sup>。

美国已有利用上流式厌氧污泥床(Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)处理污泥的案例,并被认为是20世纪90年代最广泛使用的高效率污泥厌氧消化工艺<sup>[4]</sup>;德国的城市污水厂通过污泥沼气发电,可满足其自用电力57%<sup>[5]</sup>。但中国因污泥处理事业起步较晚,整体发展水平较低<sup>[6]</sup>。

### 1 厌氧消化的基本原理

#### 1.1 厌氧消化过程理论

厌氧生物处理又称为厌氧消化或是厌氧发酵,它是指在严格厌氧条件下,通过多种微生物(厌氧或兼性菌)的共同作用,将各种复杂有机物分解转化为含大量 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ 等沼气能源的复杂过程。

厌氧消化过程理论经历了两阶段理论、三阶段理论到四菌群学说<sup>[7]</sup>,三段理论和四菌群学说描述较为全面和准确。其中,Lise Apples等<sup>[8]</sup>提出了有机物厌氧消化的4个阶段,即水

收稿日期:2010-05-10;修回日期:2010-12-11

作者简介:汤兵,教授,研究方向为水污染控制中的传递现象及废水高效净化技术研究等,电子信箱:renytang@163.com

解阶段、发酵产酸阶段、产氢产乙酸阶段及甲烷化阶段,其消化过程如图 1 所示。

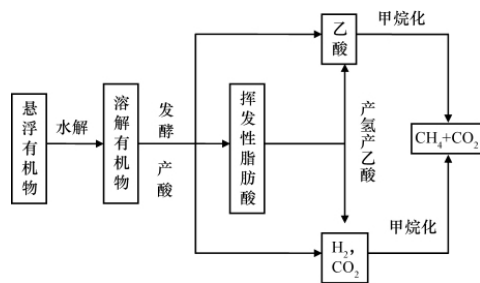


图 1 四菌群学说厌氧消化过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of anaerobic digestion

最后一个阶段是由两种甲烷菌群完成的,一种菌群将醋酸盐分解为  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ ; 一种菌群使用氢作为电子供体,  $\text{CO}_2$  作为电子受体产生  $\text{CH}_4$ 。

## 1.2 厌氧消化的主要影响因素

污泥厌氧消化就是利用各种微生物分解有机物,其中产甲烷阶段是厌氧过程的重要步骤。本文讨论厌氧消化的影响因素,就是讨论影响甲烷菌生长的各项因素<sup>[9-11]</sup>,主要如下:

(1) 温度。厌氧消化分为常温、中温 ( $28\sim 38^\circ\text{C}$ ) 和高温 ( $48\sim 60^\circ\text{C}$ ) 厌氧消化,实验表明,中温厌氧消化是高效经济的方法。最佳温度为  $35^\circ\text{C}$ 。

(2) pH 值。pH 值是影响厌氧消化的重要因素之一。每种微生物群都有各自最适宜生存的 pH 值范围,而在厌氧消化中,产甲烷菌对 pH 值尤其敏感,其最佳生存的 pH 值范围为  $6.5\sim 7.2$ 。

(3) 有机负荷。当有机负荷过高时,会造成反应器内的酸积累,从而影响消化速率及效果;而当有机负荷过低时,又使得消化池容积增大,增加了运行费用。

(4) 厌氧活性污泥搅拌和混合。搅拌的目的是使反应器内混合液达到均质状态,可以提高消化速率。研究表明,在启动初期采取适量的搅拌能够促进水解阶段的进行。但搅拌也会带来负面的影响,长期搅拌将不利于厌氧污泥颗粒的形成。因此,在实验中要找出一个最适合的搅拌速度及搅拌时间。

(5) 营养比。反应器中的营养由所投配的生污泥提供。C/N 在营养配比中很重要,当 C/N 太高,细菌氮量不足,消化液缓冲能力降低,造成 pH 值上升,铵盐累积;而当 C/N 过低,氮含量过高,会抑制消化的进行。研究发现,厌氧消化最适宜的 C/N 为  $(30\sim 20):1$ 。

(6) 有毒物质。主要是一些对甲烷菌有抑制作用的物质,例如重金属、钠离子、钾离子、钙离子、镁离子、 $\text{NH}_4^+$ 、表面活性剂以及硫酸根、硝酸根和亚硝酸根离子等。

## 2 典型高负荷厌氧生物反应器工艺特点及其应用

### 2.1 高负荷厌氧生物反应器的研究历史

厌氧生物反应器在城市污水处理厂中常用于处理污泥,

起稳定污泥和产气效用<sup>[10]</sup>。20 世纪 70 年代以来,随着人们对厌氧消化理论及其在实际应用中的深入研究,相继开发了多种高效厌氧生物反应器,如厌氧滤池 (AF)、上流式厌氧污泥床 (UASB) 反应器、厌氧附着膜膨胀床 (AAFE)、厌氧膨胀颗粒污泥床 (EGSB) 及内循环 (IC) 式厌氧反应器等。按时间顺序,厌氧生物反应器可分为 3 个时代<sup>[12-13]</sup>。

第 1 代厌氧生物反应器,主要是普通厌氧消化池,已有百余年的历史,属于低负荷消化系统,消化效率低。第 2 代厌氧生物反应器,通过提高反应器内污泥浓度来增加生物量,提高厌氧效率,属于高负荷系统。主要有:厌氧接触法;20 世纪 60 年代末开发的厌氧滤池;70 年代初由 G. Lettinga 等研制开发 UASB 反应器,标志着厌氧反应器研究进入了新的时代;厌氧流化床 (AFB);厌氧转盘和挡板反应器。第 3 代厌氧生物反应器是在第 2 代的基础上发展起来的,它除了进一步实现了固体停留时间和水力停留时间的分离,使固液两相充分接触,以达到高效处理的目的,还在设计上注重布水均匀,避免了短流和死角等现象。该类型反应器主要有:升流式厌氧流化床 (UFB);厌氧膨胀颗粒污泥床 (EGSB);内循环式厌氧反应器。

### 2.2 典型的高负荷厌氧生物反应器的运行机制及其应用

#### 2.2.1 UASB 反应器

UASB 反应器是一种结构简单、紧凑,处理费用较低,应用最广泛且最成功的污泥厌氧反应器。该反应器在气温较高的热带国家很受欢迎。反应器内设有载体,是一种悬浮生长型消化器,由反应区、沉淀区和气室三部分组成。其中,在反应区上部设有气、液、固三相分离器,是该消化器的重要结构特性,它对污泥床的正常运行和获得良好的出水水质起十分重要的作用。

(1) UASB 反应器运行机制。废水从反应器浓度较高的污泥床底部进入,与污泥床中的污泥进行混合接触,微生物分解废水中的有机物产生沼气,微小沼气泡在上升过程中,不断合并并逐渐形成较大的气泡,大气泡上升产生较强烈的搅动,在污泥床上部形成悬浮污泥层。气、水、泥的混合液上升至三相分离器内,沼气泡通过碰撞分离器下部的反射板折向气室而被有效分离排除;污泥和水则经孔道进入三相分离器的沉淀区,在重力作用下,水和泥分离<sup>[14]</sup>。

(2) UASB 反应器应用。荷兰从 1976 年就开始利用 UASB 在低温条件下处理污泥。当时,一个  $6\text{m}^3$  的 UASB 反应器经过  $14\sim 17\text{h}$  的停留时间,在  $20^\circ\text{C}$  和  $13\sim 17^\circ\text{C}$  下, COD (化学需氧量) 去除率分别为  $65\%\sim 85\%$  和  $55\%\sim 70\%$ 。继荷兰之后,德国、瑞士、美国、加拿大以及中国等相继开展了对 UASB 的深入研究。安徽某大型啤酒厂已建成规模  $4500\text{m}^3$  废水处理站,采用 UASB 与好氧联合处理, COD 去除率大于  $85\%$ <sup>[15]</sup>。Ayooob Torkian 等<sup>[16]</sup>利用 UASB 反应器研究了有机负荷率 (COD) 为  $13\sim 30\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  的屠宰废水,结果显示,溶解性 COD (SCOD) 去除率高达  $75\%\sim 90\%$ ,但当有机负荷率 (COD) 高于  $30\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  时,会出现处理效果不稳定。也有研究者<sup>[17]</sup>发现污泥在  $12\sim$

18℃下,经过7~12h停留时间,能使污泥中的总COD(TCOD)和生化需氧量(BOD)的去除率分别达到40%~60%和50%~70%。研究发现,污泥跟废水的接触大大影响了处理效果,特别是在产气不多的低温条件下。

Nidal Mahmoud等<sup>[18]</sup>研究了UASB单相系统和UASB与UASB-Digester(厌氧消化反应器相结合)系统对污泥厌氧消化的处理。UASB-Digester多了一个污泥处理和稳定化反应器。UASB反应器在15℃和停留时间为6h的条件下运行,而厌氧反应器在35℃条件下运行。结果表明,UASB与UASB-Digester系统有更高的COD去除率。UASB与厌氧反应器相结合的系统 and 单相UASB系统对总悬浮固体物质(TS)、悬浮固体物质(SS)、SCOD的去除率分别为66%、87%、30%和44%、73%、5%。该研究还表明,UASB-Digester系统产生的剩余污泥很低,且污泥更稳定更容易脱水。

国外学者研究了UASB反应器的启动和污泥形成过程中,不同负荷条件下污泥的特性变化。结果显示,当有机负荷率(COD)在2.0~4.5kg/m<sup>3</sup>且负荷率(COD)在0.1~0.25kg/kg(VSS)·d(VSS为挥发性悬浮固体物质)时,COD去除率高于90%<sup>[19]</sup>。

### 2.2.2 厌氧膨胀颗粒污泥床

EGSB反应器是在UASB基础上,加上一个水流循环形成的。该反应器的高上升流速率能够保持颗粒污泥床的悬浮扩散状态,使污泥跟废水充分接触,以此提高溶解性物质的去除。但是由于高上升流速率,使得反应器中的SS去除率不高。而且EGSB反应器自问世至今不过20年历史,所进行的研究非常有限。中国在此方面与国外相比有较大差距,大多处在试验阶段,工程应用较少。

(1) EGSB运行机制。EGSB反应器主要是由配水系统、反应区、三相分离器、沉淀区、出水系统以及出水循环五部分组成的。废水通过配水系统均匀地分配到反应器底部的各个位置,形成的均匀上升流能够使废水和污泥充分混合,促进有机物质的降解。反应所产生的沼气经三相分离器排出。此时,沉淀区的污泥由于没有受到沼气上升流搅拌的影响而沉降到反应器主体部分,使反应器保持高的污泥浓度。反应器出口的废水一部分通过出水循环系统回流到底部。

(2) EGSB应用。第三代高效厌氧生物反应器EGSB主要以著名的水处理公司Biothane公司开发的Biobed EGSB为代表。该公司研究的反应器污泥沉降性能优良,且能培养出大直径厌氧颗粒污泥,从而提高处理负荷<sup>[20]</sup>。

李再兴等<sup>[21]</sup>利用自制EGSB反应器在常温下处理低浓度小区生活污水,进水COD为411~560mg/L,出水COD为67~88mg/L,去除率超过85%。但该研究仅停留在低浓度废水的处理。对此,清华大学左剑恶等<sup>[22]</sup>进行了EGSB处理高浓度有机废水的实验研究,进水COD可达到8200~90000mg/L,出水COD去除率最高达98%。颜智勇等<sup>[23]</sup>也利用EGSB处理COD为8000~12000mg/L的高浓度废水,去除率达85%。

将EGSB反应器与其他工艺相结合能提高COD去除率。如Chu等<sup>[24]</sup>研究了EGSB反应器与膜的联合使用的系统。温度高于15℃时,COD去除率达到90%~88%;而在11℃,水力停留时间从3.5h增加到5.7h时,COD去除率从76%增加到81%。而且由于高速的上升流,可以减少膜污染。使用该系统,不仅提高了处理效率,而且减少了膜维护的费用。

### 2.2.3 内循环式厌氧反应器

IC厌氧反应器是在20世纪80年代中期由荷兰Paques公司开发的专利。1985年,荷兰首次用IC厌氧反应器处理土豆加工废水。与UASB反应器相比其停留时间大大减少。IC厌氧反应器相当于两级UASB,第一反应室为粗处理,然后在第二反应室做进一步处理,保证出水水质。IC厌氧反应器由混合、膨胀床、精处理和回流4部分组成。底部为极端高负荷,上部为低负荷<sup>[13,15,25]</sup>。

(1) IC厌氧反应器运行机制。污水通过反应器底部进入第一反应室,与厌氧颗粒污泥混合均匀,大部分有机物被转化成沼气,由集气罩收集,沿提升管携带混合液提升至气液分离器,分离出的沼气从气液分离器的顶部导管排出;而分离出的泥水混合液沿着回流管返回到第一反应室底部,与底部颗粒污泥和进水充分混合,实现混合液内循环。

(2) IC厌氧反应器应用。IC厌氧反应器具有高容积负荷、抗冲击负荷能力强、节省空间、运行稳定等优点,已成功应用于如啤酒、造纸、果汁等工业废水处理中。例如,哈尔滨啤酒有限公司利用IC厌氧反应器处理啤酒废水,取得了较好的经济效益、社会效益和环境效益<sup>[26]</sup>。陈勇等<sup>[27]</sup>经过实验研究了IC厌氧反应器在印染废水处理中的应用,结果显示,COD去除率可达80%左右,色度去除率达70%以上,但对工艺的控制要得当。IC厌氧反应器也可与其他工艺相结合,以达到更好的去除效果。国内已经有利用IC厌氧反应器和CASS(Cyclic Activated Sludge System)工艺联合处理酒精废水的工程实例,COD去除率可达97%以上。

## 3 结语

污泥处理技术有很多种,如好氧法、厌氧法、预处理、调理等,其中厌氧技术是最常用且效果相对较好的方法。它处理所需能耗低,并且能够产品沼气等再生能源物质,缺点是厌氧微生物增长缓慢,导致厌氧反应器启动时间较长,短则两三个月,长则半年甚至一年以上,将大大增加投资费用。由此出现了以上高负荷厌氧生物反应器研究。综上所述,总结高负荷厌氧生物反应器未来研究重点如下。

(1) UASB反应器、EGSB反应器属于高效厌氧生物反应器,但存在缺陷。如UASB处理后出水水质不好,一般作为预处理与其他工艺联用;而EGSB对悬浮固体去除率低,可以联合某种特定的膜提高效率。因此,今后可以重点研究各种高效厌氧生物反应器联合使用的系统,或是厌氧与好氧相结合的系统,找出更高效、更低成本的厌氧生物反应器。

(2) 可以在污泥进入反应器之前, 先通过预处理方法。如: 污泥超声处理、热处理和化学处理等, 对污泥进行预处理, 然后再进入反应器当中。这样可以加快反应器启动。

(3) 有研究发现利用载体可以提高牛粪厌氧消化处理, 并且活性炭颗粒效果最佳。有研究发现利用载体可以提高牛粪厌氧消化处理, 并且活性炭颗粒效果最佳, 但作者未深入研究该法在其他污泥厌氧消化处理中的应用状况。

#### 参考文献 (References)

- [1] 肖本益, 阎鸿, 魏源送. 污泥热处理及其强化污泥厌氧消化的研究进展[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 673-681.  
Xiao Benyi, Yan Hong, Wei Yuansong. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4): 673-681.
- [2] 戴前进, 方先金, 邵辉煌. 城市污水处理厂污泥厌氧消化的预处理技术[J]. 中国沼气, 2006, 25(2): 11-14, 19.  
Dai Qianjin, Fang Xianjin, Shao Huihuang. *China Biogas*, 2006, 25(2): 11-14, 19.
- [3] 台明青, 贾东方, 张丽莉, 等. 城市污泥厌氧消化处理研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(12): 21-24.  
Tai Mingqing, Jia Dongfang, Zhang Lili, et al. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2006, 24(12): 21-24.
- [4] Seghezzi L, Zeeman G, van Lier J B, et al. A review: The anaerobic treatment of sewage in uasb and EGSB reactors [J]. *Bioresource Technology*, 1998, 65: 175-190.
- [5] 杭世据, 刘旭东, 梁鹏. 污泥处理处置的认识误区与控制对策[J]. 中国给水排水, 2004, 20(12): 89-92.  
Hang Shiju, Liu Xudong, Liang Peng. *China Water and Wastewater*, 2004, 20(12): 89-92.
- [6] 戴前进, 李艺, 方先金. 城市污水处理厂剩余污泥厌氧消化试验研究 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 95-98.  
Dai Qianjin, Li Yi, Fang Xianjin. *China Water and Wastewater*, 2006, 22(23): 95-98.
- [7] 黄海峰, 杨开, 王晖. 厌氧生物处理技术及其在城市污水处理中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2005, 23(6): 37-40.  
Huang Haifeng, Yang Kai, Wang Hui. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2005, 23(6): 37-40.
- [8] Apples L, Baeyens J, Degreve J, et al. Principles and potential of anaerobic digestion of waste-activated sludge [J]. *Process in Energy and Combustion Science*, 2008, 34: 755-781.
- [9] 唐受印, 戴友芝, 等. 废水处理工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
Tang Shouyin, Dai Youzhi, et al. *Wastewater treatment engineering*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [10] Gerardi M H, Somerset W. The microbiology of anaerobic digesters[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 106: 177-178.
- [11] 尹守迁. 污泥厌氧消化处理工程技术问题探讨 [J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2008, 35(1): 7-11.  
Yi Shouqian. *Safety, Health and Environmental Protection of Railway Labour*, 2008, 35(1): 7-11.
- [12] 曹冬梅, 刘坤. 城市污泥厌氧消化产沼气资源化研究[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(11): 26-28.  
Cao Dongmei, Liu Kun. *Industry Safety and Environmental Protection*, 2006, 32(11): 26-28.
- [13] 何连生, 朱迎波. 高效厌氧生物反应器研究动态及趋势[J]. 环境工程,

- 2004, 22(1): 7-11.  
He Liansheng, Zhu Yingbo. *Environmental Engineering*, 2004, 22(1): 7-11.
- [14] Liu Yu, Xu Hailou, Yang Shufang, et al. Mechanisms and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor [J]. *Water Research*, 2003, 37: 661-673.
- [15] 陈威, 朱雷, 梁华杰. 废水厌氧生物处理的研究与进展 [J]. 国外建材科技, 2006, 27(1): 51-53.  
Chen Wei, Zhu Lei, Liang Huajie. *Foreign Building Materials Technology*, 2006, 27(1): 51-53.
- [16] Torkian A, Egbali A, Hashemian S J. The effect of organic loading rate on the performance of UASB reactor treating slaughterhouse effluent[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2003, 40: 1-11.
- [17] de Man A W A, van der Last A R M, et al. The use of EGSB and UASB anaerobic systems on low strength soluble and complex wastewaters at temperatures ranging from 8 to 30°C [C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Anaerobic Digestion. 1988: 197-208.
- [18] Mahmoud N, Zeeman G, Gijzen H, et al. Anaerobic sewage treatment in a one-stage UASB reactor and a combined UASB-Digester system[J]. *Water Research*, 2004, 38: 2348-2358.
- [19] Ghangrekar M M, Asolekar S R, Joshi S G. Characteristics of sludge developed under different loading conditions during UASB reactor start-up and granulation[J]. *Water Research*, 2005, 39: 1123-1133.
- [20] 刘永红, 贺延龄, 胡勇. 膨胀颗粒污泥床反应器高负荷运行特性研究 [J]. 工业用水与废水, 2008, 39(1): 12-14, 19.  
Liu Yonghong, He Yanling, Hu Yong. *Industrial Water and Wastewater*, 2008, 39(1): 12-14, 19.
- [21] 李再兴, 杨景亮, 叶莉, 等. 厌氧颗粒污泥膨胀床(EGSB)处理生活污水试验研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(10): 1345-1348.  
Li Zaixing, Yang Jingliang, Ye Li, et al. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(10): 1345-1348.
- [22] 左剑恶, 王妍春, 陈浩, 等. 膨胀颗粒污泥床(EGSB)反应器处理高浓度自配水的试验研究[J]. 中国沼气, 2001, 19(2): 8-11.  
Zuo Jian'e, Wang Yanchun, Chen Hao, et al. *China Biogas*, 2001, 19(2): 8-11.
- [23] 颜智勇, 胡勇有, 谢磊. EGSB 处理高浓度有机废水的启动与微生物相[J]. 工业用水与废水, 2007, 38(3): 20-23.  
Yan Zhiyong, Hu Yongyou, Xie Lei. *Industrial Water and Wastewater*, 2007, 38(3): 20-23.
- [24] 匡武, 殷福才, 孙世群, 等. UASB 工艺在啤酒废水处理中的应用[J]. 中国给水排水, 2006, 22(16): 62-66.  
Kuang Wu, Yin Fucui, Sun Shiqun, et al. *China Water and Wastewater*, 2006, 22(16): 62-66.
- [25] 施爱享, 施英乔, 丁来保, 等. 废水处理厌氧生物反应器研究进展[J]. 生物质化学工程, 2008, 42(5): 37-42.  
Shi Aixiang, Shi Yingqiao, Ding Laibao, et al. *Biomass Chemical Engineering*, 2008, 42(5): 37-42.
- [26] 曲艳辉, 孙涛. IC 工艺在啤酒废水处理中的实例 [J]. 酿酒, 2009, 36(4): 71-73.  
Qu Yanhui, Sun Tao. *Liquor Making*, 2009, 36(4): 71-73.
- [27] 陈勇, 安刚. IC 工艺处理印染废水的实验研究[J]. 染整技术, 2008, 30(9): 28-30.  
Chen Yong, An Gang. *Textile Dyeing and Finishing Journal*, 2008, 30(9): 28-30.

(责任编辑 岳臣)