

厌氧膜生物反应器在废水处理中的研究进展

白玲^{1,2}, 蓝伟光^{1,3}, 万金保¹

(1. 南昌大学环境科学与工程学院, 江西 南昌 330047;

2. 江西农业大学理学院, 江西 南昌 330045; 3. 新达科技集团, 新加坡 569095)

[摘要] 厌氧膜生物反应器是一种处理高浓度有机废水的有效工艺。综述了厌氧膜生物反应器的特征, 在工业废水处理中的应用以及低温下厌氧处理低浓度废水的效果, 并展望了厌氧膜生物反应器的应用前景。

[关键词] 废水处理; 厌氧膜生物反应器; 膜通量

[中图分类号] X703.1 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2007)09-0016-05

Progress of membrane coupled anaerobic bioreactor in wastewater treatment

Bai Ling^{1,2}, Lan Weiguang^{1,3}, Wan Jinbao¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2. College of Natural Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

3. Sinomem Technology Limited, Singapore 569095, Singapore)

Abstract: Membrane coupled anaerobic bioreactor is a kind of effective technique applied to treat highly concentrated organic wastewater. New development of membrane coupled anaerobic bioreactor in wastewater treatment is reviewed, including its characteristics, application to industrial treatment and to anaerobic treatment of wastewater with low concentration under psychrophilic conditions. The application prospect in future are probed into.

Key words: wastewater treatment; membrane coupled anaerobic bioreactor; membrane flux

膜生物反应器 (Membrane Bioreactor, MBR) 是将酶、微生物或动、植物细胞等固定在具有特定化学性质的聚合物膜面上或膜腔内, 或将游离的酶、微生物或动、植物细胞限制在特定的空间范围内, 以实现废水的生化反应与分离同时进行的一种特殊反应器。膜生物反应器最早用于微生物发酵工业, 在废水处理领域中的应用研究始于 20 世纪 60 年代, 最初主要用于处理生活污水, 20 世纪 90 年代以来, 其在工业废水处理中的应用研究应用逐渐受到重视。我国对膜生物反应器的研究虽然起步较晚, 但发展非常迅速。近 30 年来, 膜生物反应器已经逐步应用于市政污水和工业废水的处理之中^[1,2]。

随着世界能源的日益短缺、废水污染负荷的日益加大及废水中污染物种类的日趋复杂化, 废水厌氧生物技术以其投资省、能耗低、可回收利用沼气能源、负荷高、产泥少、耐冲击负荷等优点, 受到人们的关心和重视。厌氧生物处理 (Anaerobic Biological Treatment) 是指在无溶解氧的条件下, 通过厌氧微生物

的作用, 将污水中所含有的各种复杂有机物, 如碳水化合物(糖)、脂肪、蛋白质等经厌氧分解转化成无机物和少量的细胞产物(沼气和水), 从而达到废水处理和能源回收的目的。厌氧生物处理技术是处理有机废水的有效手段, 但该技术在过去的 100 年里发展缓慢, 原因是厌氧工艺要求保持较高的微生物浓度、较长的污泥龄和较短的水力停留时间, 使其应用受到一定的限制。膜分离技术与厌氧工艺的结合则克服了以上的不足, 并成为高效厌氧处理系统(厌氧反应器)的发展方向。厌氧膜生物反应器(Membrane coupled anaerobic bioreactor, MCAB)是把膜技术作为生物系统出水过滤的末端处理单元^[3,4], 用于许多生物和非生物污染物的去除^[5]。高效厌氧处理系统指水力停留时间(HRT)与固体平均停留时间(SRT)相分离的系统, 该系统在高水力负荷时必须保持反应器内较高的生物浓度, 并能保证污水和反应器内的污泥之间良好的接触。到目前为止世界上已有 40 多个国家从事这方面的研究和应用, 已有数千台高效

厌氧反应器在实际生产中使用。

MCAB主要用于处理工业废水和垃圾渗滤液。在生活污水中应用较少^[6],也可用于处理难生物降解的有机废水^[6],是一种处理高浓度有机废水的有效工艺^[7-12],已成为国外如 WERF(Water Environmental Research Foundation) 等协会研究的重点之一^[13]。

1 MCAB 的特点和存在的问题

1.1 负荷率高

厌氧 MBR 的 COD 负荷在 2.9 ~50 kg/(m³·d), COD 的去除率在 85% ~97%。而好氧 MBR 一般在 1.2 ~30 kg/(m³·d), COD 的去除率在 90% ~97%。因此厌氧 MBR 特别适合处理高浓度有机废水,同时,可减小反应器体积,使占地面积减小。厌氧菌生长速度慢而处理的污水浓度高时,意味着 SRT 通常较长,一般以天为单位。而好氧 MBR 一般以小时为单位。T. H. Yoon 等^[14]采用混合 MBR 系统(包括缺氧、厌氧和好氧池)处理市政废水,当 SRT 高达 50 d 时,提高了 N 的去除率,高达 71.7%,且运行稳定。

1.2 产气量

甲烷是 MCAB 工艺的最终产物,也是一种有用的气体。其产热率根据所产生的生物气体含二氧化碳的不同约为 22 ~26 MJ/m³。报道的甲烷产率(以单位 COD 计)为 0.17 ~0.29 m³/kg,但实际产率与污水的来源及操作条件有很大关系。当甲烷比率为 65% ~75%时,表示系统运行良好。因此可通过产气量的变化来判断系统的运行情况,一旦发生异常,可调整操作参数使系统在最佳状态下运行。另一方面运行过程中可利用甲烷降低能耗。D. Jeison 等^[15]研究了在厌氧 MBR 废水处理中通过膜压差(TMP)的稳定状态评价进行在线滤饼层的管理。且在运行中采用将系统产生的生物气循环至 MCAB 的方法,大大降低了能耗。

1.3 膜通量

大部分 MCAB 的构型是外置式的。外置式膜生物反应器是将膜过滤装置与反应器分开设置的膜生物反应器。因为在 MCAB 中缺少空气鼓泡,所以外置式 MCAB 需要通过水泵来进行液体循环以改善污染状况。有报告说在采用外置式 MCAB 处理玉米加工废水时,循环比为 1:6 的情况下原水和污泥的混合条件非常好,缺点是能耗高,且膜通量较小。为了改善这种状况,近年来的研究多集中在对浸没式 MCAB 的研究。浸没式膜生物反应器则是将膜组件放入反应器中直接对膜进行抽吸,使混合液经膜过滤

而得到过滤出水,能耗低、膜通量较大、结构更为紧凑。N. Ren 等^[16]研究了用浸没式 MCAB 处理高浓度医药废水,用误差反向传播人工神经网络(BPANN)优化操作参数,能有效减轻膜污染,膜通量为 8.0 ~20.0 L/(m²·h)。王志伟等^[17,18]试验用一体式厌氧膜生物反应器处理上海冠生园集团华光酿酒药业有限公司的高浓度有机废水,研究了三种不同材质的膜(PAN、PES 和 PVDF)的过滤特性。并通过数据拟合得出不同的膜通量和膜阻力随时间的数学模型表达式。结果表明,在相同的操作条件下,PAN 膜通量维持在一个较高水平,膜污染速度增长缓慢,是该试验条件下厌氧膜生物反应器的最佳膜材质。研究表明 MCAB 进水平均 COD_{Cr} 为 25 764 mg/L, COD_{Cr} 容积负荷为 5.2 ~8 kg/(m³·d),平均出水 COD_{Cr} 为 1 294.5 mg/L,平均去除率为 95%,但出水不达标,还要进行后续处理。对 SS 浊度和色度有较好的处理效果。

膜污染是影响膜通量的主要因素之一。膜污染是膜应用的一个技术障碍,因此对膜污染特性的研究尤为重要,是研究开发相应的膜污染控制技术的前提和基础。K. H. Choo 等^[13]研究了分置式厌氧膜生物反应器的运行状况,发现膜外部污染是内部污染的 30 倍。S. Elmaleh 等^[8]的研究表明膜污染主要是由于颗粒的沉积造成的,并且认为错流达到一定程度后,可以避免颗粒沉积。K. H. Choo 等研究了厌氧膜生物反应器污泥混合液组分对膜污染的影响,结果表明膜污染阻力主要是泥饼层阻力而且主要是由污泥混合液中的细小胶体颗粒所造成的阻力。这些试验研究主要是对分置式厌氧膜生物反应器的污染性能的研究。B. D. Cho 等^[19]研究了厌氧生物反应器错流微滤系统在次临界通量的操作条件下的污染特性。I. J. Kang 等^[20]对外置式厌氧 MBR 处理酒厂废水中的有机膜和无机膜的过滤特性进行了比较:对有机膜和无机膜,滤饼层阻力分别占 37%和 4%,内部污染阻力分别占 56%和 90%。无机膜由于价格昂贵,实际使用较少。研究表明反冲洗和回流方式能有效地减轻膜污染。有机膜用酸性(pH 2.0)反冲洗,膜通量增加两倍;无机膜用碱性反冲洗,提高了膜通量,且采用回流方式能获得更高的膜通量。清洗方法可以是在线和离线清洗。王志伟等^[21]研究了一体式 MCAB 在处理酒厂高浓度有机废水时的膜污染特性。试验分析了膜阻力分布状况。结果表明,外部阻力(浓差极化阻力和泥饼层阻力之和)占总阻力的 98%,小于膜孔的物质进入膜孔内引起堵塞与吸附

而形成的内部阻力仅占总阻力的 2%。比较 I. J. Kang 和王志伟的研究差异较大,可能是 MCAB 的构型不同所致,有待于进一步研究。方绪亮等^[21]用厌氧超滤膜生物反应器处理高浓度食品废水,考察了超滤膜表面形貌对膜通量衰减的影响。结果表明,超滤膜的表面形貌对厌氧膜生物反应器的膜污染产生重要影响,并且膜表面形貌愈粗糙,膜通量下降愈严重;膜表面形貌影响膜通量的恢复,膜表面形貌愈粗糙,清洗效果就愈差,恢复率就愈低。

因此,对于膜通量的改善主要应从以下方面进行:(1)优化膜组件的设计和 MCAB 的构型;(2)优化工艺操作条件;(3)膜类型和膜材料的选择。通过膜通量的改善以求达到经济和高效的目的。

1.4 存在的问题

目前,MCAB 工艺尚存在以下几方面的问题:(1)厌氧生物处理启动时间较长;(2)运行管理较为复杂;(3)可能造成二次污染,故系统的各处理构筑物应尽可能做成密封,以防臭气散发;(4)不能完全去除废水中的氮和磷,去除有机物不彻底,故常与好氧处理相配合。国内外已对快速启动厌氧生物反应器的方法进行了大量研究^[23],包括投加无机絮凝剂或高聚物,投加细微颗粒物及选择快速启动技术,对废水处理的工程实践具有一定的指导意义。

2 MCAB 在工业废水处理中的应用

工业废水中有机物浓度很高,有的还含有毒性物质,此外许多工业废水中含有烃类化合物和表面活性剂等污染物质。对此类废水的处理普遍认为厌氧法较好氧法经济,但不同的厌氧工艺都要求较高的微生物的浓度、较长的泥龄、较短的水力停留时间,使厌氧工艺受到了限制,而膜分离技术和厌氧工艺的结合使上述问题迎刃而解。膜组件能够将所有的生物固体截留在生物反应器中,同时也能将大分子污染物截留在反应器中,这样可使废水中的难降解物质在高污泥浓度和很长的污泥停留时间下最终被生物降解。这两者的结合是一种相互补充、相互协调的关系。因此,厌氧膜生物反应器必将在工业废水的处理中得到更广泛的研究和应用。

1987年,南非成功地建成了一套厌氧 MBR 处理玉米加工废水的装置。它采用分置式聚醚砜管式膜组件,处理水量可达 500 m³/d。其进水中含有溶解性无机物、蛋白质、氨基酸及其他含氮有机物、乳酸、糖和分散的颗粒物(淀粉、面筋纤维和粉末活性炭)。其中有机物主要有天然淀粉、葡萄糖及副产品如面

筋(20%的蛋白质)、玉米面筋(60%的蛋白质)和玉米芽(50%的油块)等。处理后,COD 去除率为 97%,出水 SS 为 0。

A. F. Razi^[24]采用厌氧膜生物反应器处理酿酒废水。该工艺采用超滤膜组件,其切割相对分子质量为 10 000,进水为新西兰 Ohlssons 酿酒厂的各废水排放口所收集的混合废水。该废水中含有浓度很高的碳水化合物,而氮元素的含量很低。实验结果表明,厌氧 MBR 具有很好的截留微生物的能力,可以使系统在很高的 SRT 条件下运行,对进水 COD 的抗冲击负荷能力强,出水水质好。Strohwalde 等采用厌氧膜生物反应器处理酿酒废水,在容积负荷为 15 kg/(m³·d),HRT 为 0.5~0.8 d 条件下,COD 去除率可达 96%~99%。W. Fuchs 等^[25]用外置式 MCAB 处理 3 种高浓度有机废水(人工配水、蔬菜加工废水和动物屠宰场废水),COD 去除率均大于 90%,出水 COD 在 100~400 mg/L 范围内。

何义亮等^[11]用厌氧膜生物反应器对高浓度食品废水进行中试研究,实验结果表明,SS 去除率为 100%,色度去除率 98%,膜对细菌截留率为 99.9%,COD 的去除率与 VFA 浓度有关,随着 VFA 浓度积累提高,COD 的去除率下降,当积累至 2 000 mg/L 以上时,COD 去除率迅速下降,系统受到抑制。管运涛^[26]用两相厌氧膜生物系统对人工配制淀粉废水的处理进行了研究,在进水 COD 1 500~7 000 mg/L,SS 1 000~4 000 mg/L,BOD 5 000 mg/L 条件下,COD 的去除率在 95%以上,SS 去除率在 92%以上。

此外,利用膜系统与高效厌氧生物反应器的结合,厌氧工艺与好氧 MBR 结合处理工业废水也获得了良好的效果。N. Ren 等^[16]采用两相厌氧 MBR 处理高浓度传统中国医药废水,运行了 452 d,COD 的去除率为 90%~99.8%。J. Shin 等^[27]利用浸没式 MBR 和厌氧升流床过滤(AUBF)反应器处理猪场废水,提高了 COD 和氮的去除率。COD、氮和总氮的去除率分别为 91%、99%和 60%。刘超翔等进行的毛染废水处理中试研究的结果表明,好氧 MBR 与厌氧酸化预处理的联合使用可进一步提高系统对 COD 和色度的去除效果,系统出水 COD < 20 mg/L,无 SS,色度 < 4 度,水质明显优于接触氧化处理工艺。崔学刚等通过厌氧工艺与 MBR 相结合处理化工废水,结果表明系统出水水质稳定,抗冲击负荷能力强,COD 的去除率大于 95%,SS 的去除率大于 99.5%。

3 低温厌氧处理低浓度废水

近 20 年, 废水的厌氧消化技术取得了巨大的进展, 随着高效厌氧反应器的发展, 大规模厌氧污水处理厂逐年增加。但是到目前为止, 大多数厌氧反应器都是在中温条件下(30~35℃)处理中、高浓度的废水。近几年来, 厌氧技术的一个挑战^[28]就是将其用于低温(<20℃)条件下处理低浓度废水(COD < 1 000 mg/L), 包括酒精厂、饮料厂、水果和蔬菜罐头厂、啤酒厂、造纸工业等工业废水以及城市生活污水。若将其加热到中温消化, 治理费用将大大增加。因此, 直接在低温下厌氧处理低浓度废水, 无疑是一种很有吸引力的技术。W. Cheng 等^[5]设计的厌氧膜生物反应器, 厌氧污泥床上部放置细纤维填料以防止在高的水力负荷下污泥洗出。中空纤维膜浸没于反应器顶部, 膜材质是聚乙烯, 孔径 0.03 μm, 过滤面积 0.3 m²。采用该反应器处理清华大学的生活污水, 试验温度范围 12~27℃。当温度 < 15℃ 时, 生物反应器的 COD 去除率 < 70%; 温度 > 20℃, COD 去除率 > 85%。由此可见, 低温下采用膜生物反应器可达到稳定的去除效果。

4 MCAB 应用展望

(1) MCAB 在实验室研究较多, 实际应用较少。应加强其在高浓度有机废水处理领域中的实际应用。

(2) 加强常(低)温下的 MCAB 水处理技术研究, 使其能得到工业化应用。

(3) 充分利用 MCAB 系统中产生的生物气作为能源代替过滤过程所需的能量, 使 MCAB 系统更为经济可行。

(4) 促进各种高效厌氧生物反应器与膜滤系统的结合, 使之更为高效和经济, 并得到更为广泛的应用。

(5) MCAB 可作为特种废水或难降解废水的优良前处理过程。再根据水质的类型, 结合好氧 MBR、纳滤和反渗透进行处理, 以使出水达标排放。

[参考文献]

- [1] Cicek N. A review of membrane bioreactors and their potential application in the treatment of agricultural wastewater [J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 2003, 45: 637- 649.
- [2] Brindle K, Stephenson T. Application of membrane biological reactors of the treatment of wastewater [J]. *Biotech. Bioeng.*, 1996, 49: 601- 610.
- [3] Ross W R. Practical Application of the ADUF Process to the Full-scale Treatment of a Maize-processor Effluent [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1992, 25(10): 27- 39.
- [4] Hogetsu A. High Rate Anaerobic Digestion of Wool Scouring Wastewater in a Digester Combined with Membrane Filter [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1992, 25(7): 341- 350.
- [5] Wen C, Huang X, Qian Y. Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration [J]. *Process Biochemistry*, 1999, 35(3- 4): 335- 340.
- [6] 刘雅巍, 张春青, 池勇志. 处理难生物降解有机物的厌氧颗粒污泥形成的技术进展 [J]. *天津城市建设学院学报*, 2004, 10(4): 263- 265.
- [7] Barber W P, Stuckey D C. The Use of the Anaerobic Baffled Reactor for Wastewater Treatment: A Review [J]. *Wat. Res.*, 1999, 33(7): 1 559- 1 578.
- [8] Elmaleh S, Abdelmoumni I. Experimental test to evaluate performance of an anaerobic reactor provided with an external membrane unit [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1998, 38(8- 9): 385- 392.
- [9] Water Environmental Research Foundation (WERF). Exploring membrane technology for wastewater treatment [EB/OL]. <http://www.werf.org/>, 2002.
- [10] 郑祥, 朱小龙, 樊耀波. 膜生物反应器处理毛纺废水的中试研究 [J]. *环境科学*, 2001, 22(4): 91- 94.
- [11] 何义亮, 吴志超, 李春杰, 等. 厌氧膜生物反应器处理高浓度食品废水的应用 [J]. *环境科学*, 1999, 20(6): 53- 55.
- [12] Fuchs W, Binder H, Mavrias G, et al. Anaerobic treatment of wastewater with high organic content using a stirred tank reactor coupled with a membrane filtration unit [J]. *Wat. Res.*, 2003, 37(4): 902- 908.
- [13] Choo K H, Lee C H. Membrane fouling mechanisms in the membrane-coupled anaerobic bioreactor [J]. *Wat. Res.*, 1996, 30(8): 1 771- 1 780.
- [14] Yoon T H, Lee H S, Kim C G. Comparison of pilot scale performances between membrane bioreactor and hybrid conventional wastewater treatment systems [J]. *Journal of Membrane Science*, 2004, 242(1- 2): 5- 12.
- [15] Jeison D, van Lier J B. On-line cake-layer management by transmembrane pressure steady state assessment in anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, 29(3): 204- 209.
- [16] Ren N, Chen Z, Wang X, et al. Optimized operational parameters of a pilot scale membrane bioreactor for high-strength organic wastewater treatment [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2005, 56(4): 216- 223.
- [17] 王志伟, 吴志超, 顾国维, 等. 一体式厌氧膜生物反应器膜材选择的试验研究 [J]. *膜科学与技术*, 2006, 26(2): 18- 21.
- [18] 王志伟, 吴志超, 顾国维, 等. 一体式厌氧平板膜生物反应器处理酒厂废水的研究 [J]. *给水排水*, 2006, 32(2): 51- 53.
- [19] Cho B D, Fane A G. Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2002, 209(2): 391- 403.
- [20] Kang I J, Yoon S H, Lee C H. Comparison of the filtration characteristics of organic and inorganic membranes in a membrane-coupled

试验研究

天然高分子改性制两性絮凝剂及其性能研究

肖锦, 周勤, 王杰

(华南理工大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510640)

[摘要] 以天然植物胶粉 F691 为原料, 通过羧甲基化、接枝共聚和曼尼奇(Mannich)三步反应合成出改性两性型絮凝剂(CG- AC), 确定了其较佳的制备条件。试验表明: 20 mg/L CG- AC 与 100 mg/L PAC 配合使用处理活性红模拟染料废水, 脱色率可达 68%, 效果明显优于对比样 PAM- C; CG- AC 对造纸混合污泥的絮凝脱水性能优于对比样 PHP 和 PAM- C。

[关键词] 天然高分子改性; 两性高分子絮凝剂; 印染废水

[中图分类号] X703.1 [文献标识码] A [文章编号] 1005- 829X(2007)09- 0020- 04

Study on the synthesis and application of an amphoteric flocculant

Xiao Jin, Zhou Qin, Wang Jie

(College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The natural wood powder F691 has been modified by carboxymethyl reaction, grafting reaction and Mannich reaction to prepare a new amphoteric polymeric flocculant(CG- AC). The optimum conditions for the preparation of CG- AC are determined. The result of applying CG- AC to the activated dyes Red X - 3B wastewater and the mixed sludge from a papermaking mill shows: when 20 mg/L of CG- AC is used with 100 mg/L of PAC the decoloration rate can reach 68%, the efficiency of which is obviously better than the contrast sample PAM- C. CG- AC also has better mixed sludge dewatering property in papermaking than that of PHP and PAM- C. Key words: natural polymer modification; amphoteric polymer flocculant; printing and dyeing wastewater

两性高分子絮凝剂的性质与普通高分子絮凝剂有所不同, 它具有等电点现象、络(螯)合作用、“挤出效应”(force out effect)、耐电解质特性和 pH 对其物化性能影响显著等特性, 使其在污泥脱水, 去除金属

离子, 去除中、小分子有机物质乃至去除低分子质量真溶性有机物质等方面, 显示出较独特的性能优势, 表现出良好的应用前景, 成为国内外研究的热点^[1]。以资源丰富、价格低廉的天然植物胶粉 F691

anaerobic bioreactor[J]. Wat. Res., 2002, 36(7): 1 803- 1 813.
[21] 王志伟, 吴志超, 顾国维, 等. 厌氧膜生物反应器膜污染特性研究[J]. 膜科学与技术, 2006, 26(1): 11- 14.
[22] 方绪亮, 何义亮, 徐培. 膜表面形貌对厌氧膜生物反应器膜污染影响的试验研究[J]. 环境化学, 2006, 25(1): 65- 68.
[23] 石宪奎, 倪文, 江翰. 厌氧生物反应器快速启动技术研究进展[J]. 给水排水, 2004, 30(11): 57- 60.
[24] Razi A F. Ultrafiltration Membrane Separation for Anaerobic Wastewater Treatment[J]. Wat. Sci. Tech., 1994, 30(12): 312- 327.
[25] Fuchs W, Binder H, Mavrias G, et al. Anaerobic treatment of wastewater with high organic content using a stirred tank reactor coupled with a membrane filtration unit[J]. Wat. Res., 2003, 37(4): 902- 908.

[26] 管运涛. 两相厌氧膜生物系统处理造纸废水[J]. 环境科学, 2000, 21(4): 52- 56.
[27] Shin J, Lee S, Jung J, et al. Enhanced COD and nitrogen removals for the treatment of swine wastewater by combining submerged membrane bioreactor(MBR) and anaerobic upflow bed filter(AUBF) reactor[J]. Process Biochemistry, 2005, 40(12): 3 769- 3 776.
[28] 初里冰, 杨凤林, 张兴文. 低温厌氧处理低浓度废水研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(4): 61- 65.

[作者简介] 白玲(1980—), 1986年毕业于江西大学, 副教授, 博士研究生, 研究方向为废水处理和资源化。电话: 13879178697, E-mail: bailing716@yahoo.com.cn。
[收稿日期] 2007- 05- 25(修改稿)