

# 低温时污泥膨胀对 MBR 中膜污染的影响

任南琪, 刘娇, 王秀蘅\*

(哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

**摘要:**通过一体式膜生物反应装置考察了在低温条件下发生污泥膨胀过程中反应器的运行效果和膜污染的情况,并从微生物角度分析了引起膜污染的因素。结果表明,低温时 COD 上清液和出水平均去除率分别为 85% 和 92%,发生丝状菌污泥膨胀后去除率变化不大。MBR 中丝状菌污泥膨胀形成的过程中,污泥沉降性变差,丝状菌丰度(FI)由 2 增加到 5,丝状菌伸出絮体形成网状结构。低温时膜操作压力随时间呈直线变化,膜组件的水力清洗周期为 15 d。在丝状菌大量繁殖时缩短到 7 d,膜污染严重。通过测定活性污泥的特性,发现膨胀污泥的胞外聚合物(EPS)总量是正常污泥的 3 倍,污泥絮体相对疏水性(RH)随 FI 的提高而增大。EPS 和 RH 增大后会引来更多物质沉积到膜表面,使膜污染速率提高,膜的运行周期变短。进一步的分析表明,混合液粘度、Zeta 电位、污泥絮体形态也是影响膜污染的因素。

**关键词:**膜生物反应器;低温;污泥膨胀;膜污染

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2009)01-0155-05

## Effect of Sludge Bulking on Membrane Fouling of MBR Under Low Temperature

REN Nan-qi, LIU Jiao, WANG Xiu-heng

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** The performance and membrane fouling of submerged membrane bioreactor were studied in the case of active sludge bulking under low temperature. The factors contributing to membrane fouling were discussed from the microorganism aspect. The results showed that COD removal efficiencies of supernatant and permeate were 85% and 92% respectively and filamentous sludge bulking had little impact on them. The sludge settleability became bad and the filament index (FI) increased from 2 to 5 during the formation of filamentous sludge bulking under low temperature. The filamentous bacteria extending from the sludge flocs formed net structure. Membrane fouling changed with time in linear under low temperature and the operation period of MBR was 15 d. However, membrane fouling was more serious in the condition of filamentous sludge bulking at low temperature, shortening the operation period of MBR to 7 d. The extracellular polymeric substances (EPS) content of bulking sludge was three times as that of normal sludge and the relative hydrophobicity (RH) of sludge flocs was decreased as FI increased. The increase of EPS and RH may cause more materials to deposit on the membrane surface, thus the membrane fouling rate improved and the operation period of MBR became short. Further analysis indicated that the mixed liquid viscosity, Zeta potential and sludge floc structure were all important factors of membrane fouling.

**Key words:** membrane bioreactor; low temperature; sludge bulking; membrane fouling

近年来,膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)在废水处理领域得到了广泛的研究和应用,但膜污染仍是制约 MBR 推广应用的主要因素<sup>[1,2]</sup>。一般研究认为,膜的高效分离作用可将微生物全部截留在生物反应器内,MBR 可以避免污泥膨胀对系统运行造成的不良影响<sup>[3]</sup>。然而,一些有关 MBR 的试验发现丝状细菌污泥膨胀现象屡有发生,且会对系统稳定运行造成一定影响<sup>[4,5]</sup>。Choi 等<sup>[6]</sup>的试验表明,在丝状菌污泥膨胀条件下膜污染情况很严重,膜污染速率加快。丝状菌的大量繁殖对膜污染的不利影响主要是由活性污泥特性如 EPS、相对疏水性等随丝状菌数量的变化而变化引起的<sup>[7]</sup>。

本实验中,MBR 在低温运行期间发生了严重的丝状菌污泥膨胀现象。低温对微生物的代谢作用、水的特性有一定的影响<sup>[8]</sup>,这会进一步影响到 MBR 在低温下的运行效果和膜污染情况。笔者通过传统微

生物镜检方法和对活性污泥相关特性测定,从微生物角度分析了低温丝状菌污泥膨胀时引起膜污染加剧的原因。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置与污水

实验装置采用一体式膜生物反应器(见图 1),有效容积为 30 L。反应器进水通过液位继电器控制进水泵的启闭来实现,出水采用间歇抽吸的方式,抽停时间分别为 8 min 和 3 min,出水管上设真空表和流量计。膜组件采用天津膜天膜技术有限公司生产

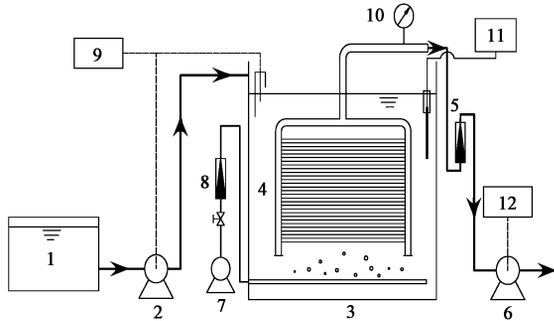
收稿日期:2008-01-02;修订日期:2008-03-23

基金项目:国家自然科学基金项目(5050811);国家自然科学基金重点项目(50638020);哈尔滨工业大学基金项目(200866)

作者简介:任南琪(1959~),男,教授,长江学者特聘教授,主要研究方向为污水处理与环境生物技术,E-mail:rnq@hit.edu.cn

\* 通讯联系人,E-mail:xiuheng@hit.edu.cn

的聚偏氟乙烯中空纤维微滤膜,膜孔径 0.2 μm,膜面积 1 m<sup>2</sup>,膜通量控制为 10 L/(m<sup>2</sup>·h).膜组件正下方设置曝气管连续曝气,曝气量为 0.32 m<sup>3</sup>/h.实验原水为人工配制的模拟生活污水(见表 1),污泥浓度控制在 6 500 mg/L 左右,反应器内水温控制在 7~8 .



1. 原水箱; 2. 进水泵; 3. 膜生物反应器;  
4. 中空纤维膜组件; 5. 出水流量计; 6. 出水泵;  
7. 曝气泵; 8. 气体流量计; 9. 液位控制系统;  
10. 精密真空表; 11. 温度测定仪; 12. 时间继电器

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

表 1 实验原水水质组成

Table 1 Compositions of synthetic wastewater

主要成分	浓度/mg L <sup>-1</sup>	水质指标	浓度/mg L <sup>-1</sup>
葡萄糖	500	COD	395 ~ 475
NH <sub>4</sub> Cl	128	TOC	133 ~ 154
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	58	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	30 ~ 38
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	10	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	6 ~ 8
CaCl <sub>2</sub>	50		
FeSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	15		
NaHCO <sub>3</sub>	40		

### 1.2 分析方法

COD 测定采用重铬酸钾法测定,MLSS/MLVSS 采用重量法测定,通过真空表测定膜过滤压差来表征膜污染的大小.活性污泥中丝状菌相对数量的大小采用 Jenkins 等<sup>[9]</sup>推荐的丝状菌丰度(filament index, FI)来表示,借助于电子显微镜(Olympus, CX31)的观察来确定. FI 分为 6 个等级(0~5):0 表示没有,5 表示过量. EPS 的提取采用甲醛-NaOH 提取法<sup>[10]</sup>,蛋白质采用修正的 Lowry 法测定<sup>[11]</sup>,多糖采用苯酚-硫酸法测定<sup>[11]</sup>,以蛋白质和多糖的加和表征 EPS 总量.污泥絮体的相对疏水性测定方法见文献[7].

## 2 结果与讨论

### 2.1 丝状菌污泥膨胀发生过程的分析

在 MBR 低温运行过程中,测定了污泥指数 SVI 和丝状菌丰度 FI 随时间的变化情况(图 2),并跟踪观察了污泥表观性状的变化(图 3).在试验初期 SVI < 100,污泥絮体结构密实,活性污泥中微型动物数量大、种类多,絮体外基本没有丝状菌伸出(图 3a),丝状菌丰度 FI 值为 2.随着污泥沉降性能的下降,微型动物数量减少,污泥絮体中有丝状菌伸出,丝状菌丰度提高,菌丝逐渐增长.MBR 运行 15 d 后 SVI > 140,污泥絮体结构松散,微型动物极少,明显可见大量的丝状菌结构,并有较多游离的菌丝.此时,丝状菌丰度 FI 值达到最大为 5.系统运行 1 个月后几乎所有污泥絮体上都有丝状菌伸出,丝状菌数量很大,伸出污泥絮体的菌丝相互交叉在一起形成网状结构(图 3b),发生典型丝状菌污泥膨胀现象.

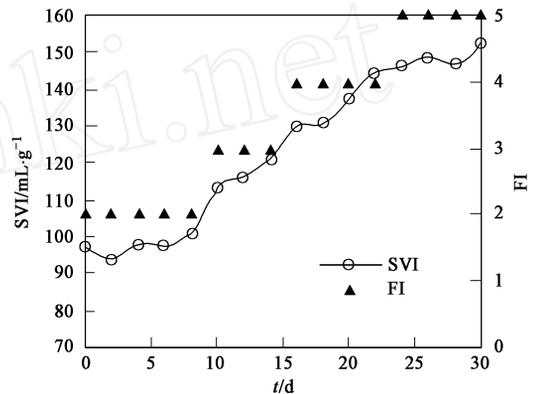


图 2 污泥膨胀形成过程中 SVI 和 FI 变化情况

Fig. 2 Variations of SVI and FI in sludge bulking formation

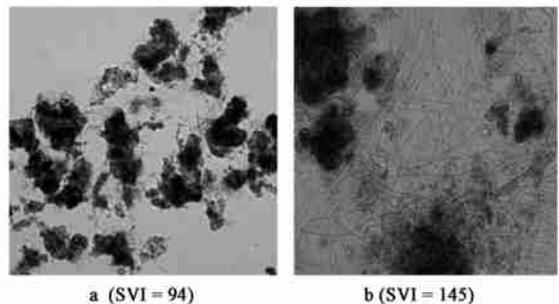


图 3 活性污泥显微镜照片(100 ×)

Fig. 3 Microscope photos of sludge flocs(100 ×)

### 2.2 MBR 运行效果及膜污染

#### 2.2.1 COD 去除情况

从图 4 可以看出,低温时 MBR 中上清液及出水 COD 平均去除率为 85%和 92%,污泥膨胀形成过程中 COD 去除率的变化不大.通常,低温时微生物的新陈代谢活性会降低,使有机物的降解效率下降.但

丝状菌具有较大的比表面积,能够抵抗不利环境条件的影响,大量生长的丝状菌对有机物的降解减轻了低温对 MBR 中 COD 生物去除率的影响.另外,出水 COD 去除率是反应器内微生物降解和膜过滤去除的总和,水温降低时膜对溶质的分离率会提高,因此膜对有机物的去除效果会显著提高<sup>[12]</sup>.膜的这个特性同样弥补了低温对微生物不利影响,保证了低温时系统出水 COD 的稳定性.

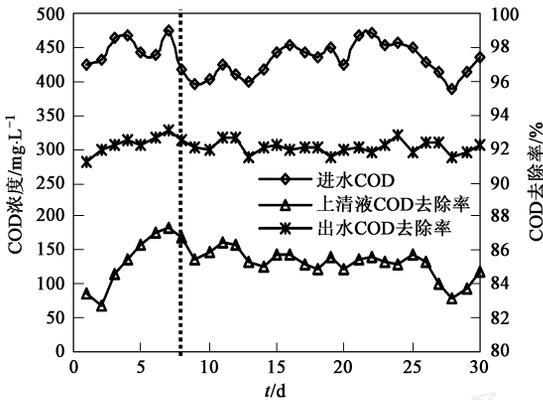


图4 低温污泥膨胀过程中 COD 去除率情况  
Fig. 4 COD removal efficiencies during sludge bulking

### 2.2.2 MBR 中膜污染情况

在 MBR 低温运行过程中,前 15 d 没有发生污泥膨胀,膜操作压力 TMP 由 4 kPa 上升至 30 kPa, TMP 随时间呈直线变化(图 5).而 MBR 在中温条件下运行时,其膜操作压力 TMP 一般随时间呈指数变化,在运行初始阶段 TMP 的变化非常小,达到膜清洗压力所需的时间远比低温时的长<sup>[13]</sup>.这说明低温条件下的膜污染比中温条件时的膜污染要严重.

系统运行 15 d 之后,反应器内污泥 SVI 值上升到 130 以上,发生丝状菌污泥膨胀,膜组件的水力清洗周期由 15 d 缩短到 7 d,膜污染速率大大增加. Meng 等<sup>[7]</sup>通过扫描电子显微镜观测显示,大量繁殖的丝状菌会导致膜表面形成不透水的泥饼层,从而使膜污染的滤饼层阻力增大,膜污染严重.从图 5 中还可以看出,水力清洗膜组件后初始 TMP 有较大的提高,这可能是由于丝状菌在膜表面以黏着、穿透膜材料等多种固定形式存在<sup>[14]</sup>,增加了膜表面污染物的附着强度,水力清洗难以将附着的污染物完全清洗掉.

### 2.3 膜污染原因分析

#### 2.3.1 EPS 对膜污染的影响

胞外聚合物 (extracellular polymeric substances,

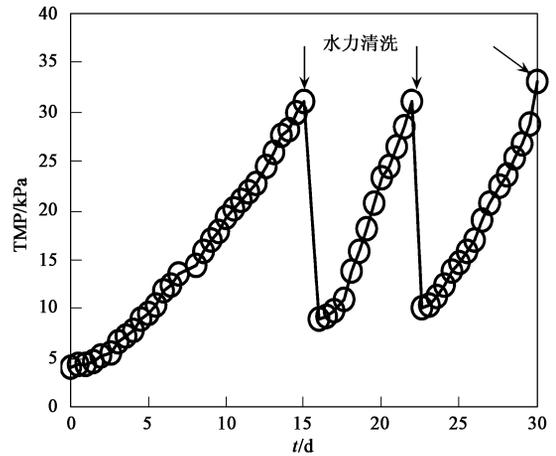


图5 低温污泥膨胀过程中膜污染情况  
Fig. 5 Membrane fouling during sludge bulking

EPS)是微生物在一定条件下产生的高分子物质,普遍存在于污泥絮体内部及表面,主要成分是多糖、蛋白质及 DNA 等<sup>[15]</sup>.图 6 为 MBR 中发生污泥膨胀前后 EPS 含量的对比.从中可见,膨胀污泥的 EPS 总量是正常污泥的 3 倍,这说明丝状菌丰度的变化会大大影响微生物胞外物质的分泌.另一方面,张凤君等<sup>[16]</sup>的研究表明,当污泥活性降低时微生物分泌的胞外物质会在反应器内积累.因此,由于在本实验的低温条件下微生物的代谢速率受到限制,这进一步促进了 EPS 的积累.

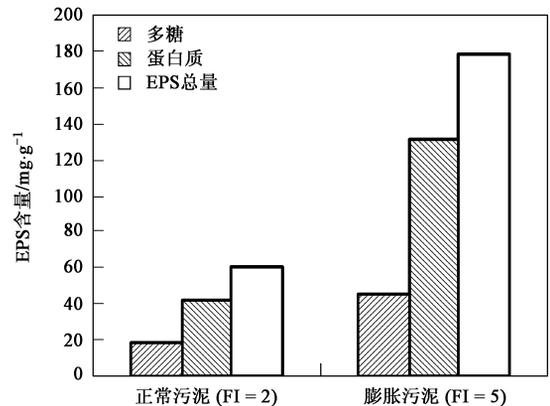


图6 污泥膨胀前后 EPS 含量对比  
Fig. 6 Comparison of EPS between normal and bulking sludge

结合图 5 与图 6 可以看出,随 EPS 含量的增加,膜污染速率提高,膜清洗周期缩短.孟凡刚等<sup>[17]</sup>的研究表明, EPS 是影响膜污染的重要因素之一. Nagaoka 等<sup>[18]</sup>认为 EPS 既在反应器中积累,也在膜表面上积累,会引起膜过滤阻力的增加.本实验中蛋白质是 EPS 的主要成分,对膜污染的贡献比多糖

大.在 MBR 中,较高的 EPS 含量会使污泥颗粒及其它污染物更容易在膜表面沉积,形成紧密的滤饼层,使膜过滤通量减小.

### 2.3.2 相对疏水性 RH 对膜污染的影响

污泥的相对疏水性 (relatively hydrophobicity, RH) 是指污泥絮体对水的排斥作用大小,是活性污泥的重要性质之一.当活性污泥疏水性较强时,污泥颗粒之间及污泥与膜表面之间存在强的疏水相互作用,污泥颗粒容易在膜面沉积形成滤饼层. MBR 低温运行时污泥膨胀前后污泥相对疏水性的对比见图 7. 可以看出,污泥絮体 RH 随丝状菌数量的增多而提高.结合图 5 与图 7 可知,污泥絮体 RH 增大后会有更多的疏水性物质沉积到膜表面,膜表面泥饼层显著增厚,膜的污染速率提高,膜的运行周期明显变短.孟凡刚等<sup>[17]</sup>的研究发现,随 EPS 含量的增加, RH 呈线形趋势增大,污泥 RH 的大小与 EPS 有很大关系. Lee 等<sup>[19]</sup>的实验发现,污泥 RH 与 EPS 中的蛋白质含量有关而与多糖几乎无关,这是因为 EPS 中的蛋白质主要是由疏水性氨基酸组成.这与本实验的结果是一致的(图 6、图 7),也进一步说明了 EPS 在膜污染研究中的重要性.

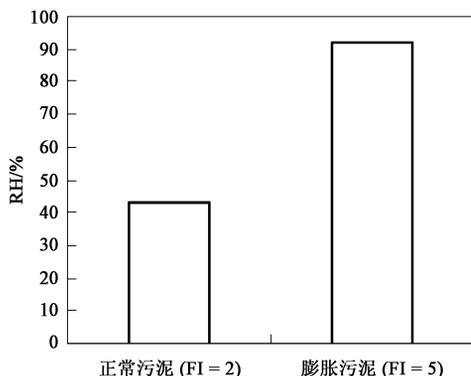


图 7 污泥膨胀前后相对疏水性 RH 对比

Fig. 7 Comparison of RH between normal and bulking sludge

### 2.3.3 其他影响因素

由于实验条件有限,对影响膜污染的其他因素未能进行检测,仅根据已有的研究对本实验中的膜污染因素进行进一步分析.

随着温度的降低,污泥混合液的黏度会增加.另外,在丝状菌污泥膨胀发生时,微生物分泌大量黏性胞外聚合物(图 6),因此低温污泥膨胀时污泥混合液的黏度就更大.污泥混合液黏度大时会使附着在膜表面的污染物质难以在水力剪切作用下脱落,导致滤饼层增厚,膜污染加剧,恶化膜生物反应器的

运行.

Zeta 电位描述了活性污泥混合液的带电情况,也是膜污染的重要影响因素之一. Wilén 等<sup>[20]</sup>的实验表明污泥絮体中多聚物的增加会使污泥表面电荷增加,从而使 Zeta 电位降低. Meng 等<sup>[7]</sup>的实验表明, Zeta 电位降低,膜污染现象严重.本实验中, EPS 含量的增加引起污泥 Zeta 电位降低,最终引起膜污染加剧,膜过滤周期缩短.

另外,通过显微镜观察,发现丝状菌的过度生长会使污泥絮体尺寸增大、絮体结构变得疏松(图 3).通常污泥悬浮液中絮体尺寸大时对膜过滤有利,但絮体尺寸只是影响膜污染的一个因素,同时还应考虑絮体形态对膜性能的影响. Meng 等<sup>[21]</sup>的实验显示,膨胀污泥絮体形态比正常污泥形态更不规则.不规则形态的污泥絮体更易于黏附在膜表面,使含丝状菌的污泥更易缠绕在膜纤维丝上,而膜丝上丝状菌的附着又会吸附更多的污染物质黏附到膜表面,增加膜表面污染物的附着强度,使膜通量降低,膜污染严重.

## 3 结论

(1) 在低温运行的 MBR 中,丝状菌丰度 FI 在 1 个月内由 2 提高到 5,污泥沉降性变差,丝状菌伸出污泥絮体,菌丝相互交叉在一起形成网状结构,发生典型丝状菌污泥膨胀现象.

(2) MBR 中上清液和出水 COD 平均去除率分别为 85% 和 92%,丝状菌污泥膨胀对 COD 去除率的影响很小.低温时膜操作压力 TMP 随时间呈直线变化,而在丝状菌大量繁殖时膜的水力清洗周期由 15 d 缩短到 7 d,严重影响膜污染情况.因此,在低温运行 MBR 时要十分重视污泥膨胀的影响.

(3) 低温条件下丝状菌的增殖影响到污泥胞外聚合物、相对疏水性、混合液黏度、Zeta 电位和污泥絮体形态,这些污泥特性的变化直接导致了膜污染速率加快,膜运行周期缩短,是膜污染的重要影响因素.

### 参考文献:

- [1] Guglielmi G, Chiarani D, Judd S J, *et al.* Flux criticality and sustainability in a hollow fibre submerged membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. *J Membr Sci*, 2007, **289**:241-289.
- [2] 纪磊,周集体,张秀红.膜生物反应器中进水组成对膜污染的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1):131-136.
- [3] 孙宝盛,张海丰,齐庚申.膜生物反应器中的非丝状菌污泥膨胀[J]. *天津大学学报*, 2006, **9**(4):469-473.

- [4] 孙寓姣,王勇.膜-生物反应器中污泥膨胀对生物相及微生物多样性影响[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(6):888-892.
- [5] 孙寓姣,王勇,黄霞.MBR系统内丝状菌污泥膨胀的分子生态学解析[J].环境科学,2004,25(增刊):56-58.
- [6] Choi J G, Bae T H, Kim J H, *et al.* The behavior of membrane fouling initiation on the crossflow membrane bioreactor system [J]. J Membr Sci, 2002, 203:103-113.
- [7] Meng F G, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Effect of filamentous bacteria on membrane fouling in submerged membrane bioreactor [J]. J Membr Sci, 2006, 272:161-168.
- [8] 左金龙,崔福义,杨威.膜生物反应器处理低温低浊水的工艺研究[J].环境科学,2007,28(2):377-381.
- [9] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming [M]. Lafayette, CA: Ridgeline Press, 1986.
- [10] Liu H, Fang H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. J Biotechnol, 2002, 95:249-256.
- [11] Lowery O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the folin phenol reagent [J]. J Biol Chem, 1951, 193:265-275.
- [12] 朴芬淑,赵玉华,张莉莉.膜生物反应器低温自补偿作用的探讨[J].沈阳大学学报,2006,18(2):67-69.
- [13] Sombatsomporn K, Visvanathan C, Ben A R. Evaluation of biofouling phenomenon in suspended and attached growth membrane bioreactor systems [J]. Desalination, 2006, 201:138-149.
- [14] 王勇,孙寓姣,黄霞.丝状菌对膜-生物反应器中膜污染过程的影响[J].中国环境科学,2004,24(2):247-251.
- [15] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge [J]. Wat Res, 2007, 41:1022-1030.
- [16] 张凤君,王顺义,邓锡斌.胞外聚合物对膜生物反应器运行性能的影响[J].吉林大学学报,2006,36:141-143.
- [17] 孟凡刚,张捍民,于连生,等.活性污泥性质对短期膜污染影响的解析研究[J].环境科学,2006,27(7):1348-1352.
- [18] Nagaoka H, Ueda S, Miya A. Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process [J]. Wat Sci Tech, 1996, 34:165-172.
- [19] Lee J, Ahn W Y, Lee C H. Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor [J]. Wat Res, 2001, 35:2435-2445.
- [20] Wilk B M, Jin B, Lant P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties [J]. Wat Res, 2003, 37:2127-2139.
- [21] Meng F G, Yang F L, Xiao J N, *et al.* A new insight into membrane fouling mechanism during membrane filtration of bulking and normal sludge suspension [J]. J Membr Sci, 2006, 285:159-165.