

微波联合 PAM 对污泥脱水性能的影响

韩洪军, 牟晋铭

(哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨)

摘要: 为提高剩余污泥脱水性能,降低絮凝剂投加量,采用某城市污水厂剩余污泥为研究对象,研究微波预处理技术联合聚丙烯酰胺(PAM)对污泥脱水性能的影响,分析不同微波加载时间和 PAM 投加量对污泥毛细吸水时间(t_{cs})、污泥比阻以及离心后污泥含水率的影响及相关机理.结果表明,适宜的联用条件对污泥脱水效果优于仅 PAM 调理,污泥 t_{cs} 、离心后含水率及污泥比阻分别由仅 PAM 调理的 37.3 s、83.68%、 $1.72 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 16.7 s、78.16%、 $0.35 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,且 PAM 投加量节省 33% 左右.适宜的微波与 PAM 联用对污泥的脱水性能有明显改善.

关键词: 微波;聚丙烯酰胺;脱水性能;毛细吸水时间;胞外聚合物

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)10-0028-05

Effect of microwave and polyacrylamide on sludge dewaterability

HAN Hong-jun, MOU Jin-ming

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

Abstract: To improve the dewaterability of residual sludge and increase the dosage of flocculant, the residual sludge from one sewage treatment plant was studied by analyzing the impact of combination of microwave pre-treatment technology and PAM on the sludge dewatering. The results showed that proper coupling technique could improve the effect of sludge dewatering considerably compared to PAM. There was significantly decrease in the value of sludge's t_{cs} , sludge's water content after centrifugation and sludge's specific resistance, from 37.3 s, 83.68%, $1.72 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (only by PAM) to 16.7 s, 78.16%, $0.35 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, and the dosage of PAM reduced by about 33%. Appropriate combination of microwave and PAM could improve the sludge dewatering significantly.

Key words: microwave; polyacrylamide; dewaterability; capillary suction time; extracellular polymeric substances

随着世界各国严格控制污水排放标准和加强污水处理的同时,污泥产量的增加及带来的环境污染已成为环保界关注的焦点.如何高效脱出占污水污泥重量 95% 以上的水分,已成为城市污泥处理处置的关键^[1-4].已有研究证明适宜的微波辐射可以明显改善污泥的脱水性能.通过微波产生的高频电磁场作用引起带负电污泥颗粒的加速运动、相互碰撞,促使污泥结构脱稳.短时间的微

波辐射引起污泥中的温度梯度,破坏结合水与 EPS(extracellular polymeric substances,胞外聚合物)之间的结合力^[5-7],从而使难处理的内部水和结合水转化为易处理的自由水.

以城市生活污水厂的剩余污泥为研究对象,采用微波辐射联合絮凝剂的方法,探讨该条件下污泥脱水性能的变化规律及相关机理,确定改善污泥脱水性能的最佳加载条件,从而减少絮凝剂投加量,达到剩余污泥经济、高效的处理目标.

1 实验

1.1 污泥来源

本试验的污泥来自武汉市某污水处理厂浓缩池的浓缩污泥,样品取回后静置 24 h,待其稳定后

收稿日期: 2012-03-18.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA06A411);
城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学)
自主课题(2010DX05).

作者简介: 韩洪军(1955—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 韩洪军, hhj@hit.edu.cn.

去掉上清液, 浓缩污泥的含水率在 92% 左右。

1.2 实验仪器

DFC-10A 型毛细吸水时间测定仪; 格兰仕 P70D21N1L-Q9 型微波加载器; TDL-5-A 型离心机; 奥林巴斯 CKX41 型电子显微镜; UV-2102PCS 型紫外可见分光光度计; DBJ-621 型定时变速搅拌机。

1.3 测定指标

包括污泥毛细吸水时间、离心脱水后污泥含水率、污泥比阻、污泥泥饼含水率等指标。

1.4 实验方法

在已有试验确定的最佳混凝剂投加量的基础上, 考虑联合微波加载主要进行下述试验研究。

1) 确定两者联用顺序。取 10 个 500 mL 的烧杯分为两组, 每组 5 个并进行编号, 在每个烧杯中分别加入 200 mL 浓缩污泥。第 1 组: 5 个污泥样品分别经微波(2 450 MHz, 700 W)30、40、50、60、70 s 后, 倒出 100 mL 污泥并分别加入 1 g/L 的 PAM 溶液 6 mL。然后在 150 r/min 转速下快速搅拌 30 s 后, 改为 50 r/min 慢速搅拌 2 min; 另一组, 先用相同投加量的 PAM 调理, 然后在相同的微波加载条件进行加载。根据 t_{cs} (capillary suction time, 毛细吸水时间) 和离心后污泥含水率等指标来确定联合处理顺序。

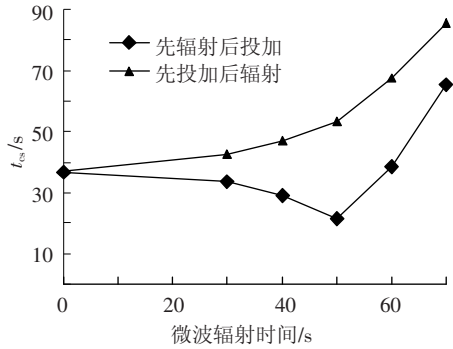
2) 确定最佳混凝剂投加量和微波加载时间。对于 100 mL 污泥样品, 取 1 g/L 的 PAM 溶液投加量分别为 0、1、2、4、6、8 mL, 微波(2 450 MHz, 700 W)加载时间分别为 0、30、40、50、60、70 s。

2 结果与分析

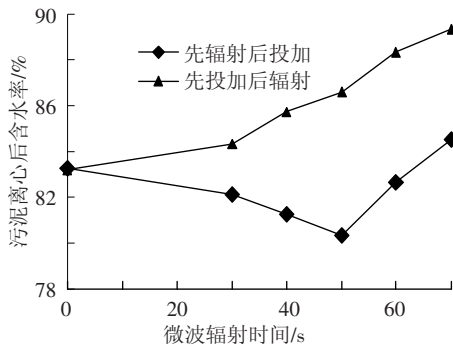
2.1 联用顺序的确定

由图 1 可以看出, 先投加 PAM(6 mL, 1 g/L) 后进行微波辐射(2 450 MHz, 700 W)顺序下, 污泥 t_{cs} 和离心后污泥含水率都呈现逐渐增大趋势, 故污泥脱水效果向着变差的方向发展, 而且不断恶化并没有改善的趋势。而先微波辐射后 PAM 调理的顺序下, 污泥 t_{cs} 在起始阶段由原来的 36.9 s 降至 21.6 s、离心后污泥含水率由 83.28% 降至 80.24%, 污泥的脱水性能得到明显改善, 虽然后期出现反常现象, 但足以表明先进行微波辐射然后进行 PAM 调节的方式明显优于先 PAM 调理后微波辐射的结合方式。原因主要是两者联用时, 以混凝剂的吸附架桥和电中和作用为主, PAM 在污泥胶质微粒表面起化学反应, 中和污泥胶质微粒的电荷, 促使污泥微粒凝聚成大的颗粒絮体^[8-9]。而微波辐射对结合水与污泥絮体之间结合力的破

坏作用, 将污泥絮体破碎成适当大小, 并释放部分结合水, 结合 PAM 调理则可进一步改善污泥脱水性能。而先进行 PAM 调节, 污泥微粒已凝聚成大的絮体, 若再用微波辐射处理, 则由于微波高频电磁场作用引起污泥颗粒的加速运动、相互碰撞, 会使 PAM 形成的絮体破碎, 同时污泥黏度进一步增加, 导致污泥的脱水性能变差。



(a) 联用顺序对污泥 t_{cs} 的影响



(b) 联用顺序对污泥含水率的影响

图 1 联合顺序对污泥脱水性能的影响

2.2 微波辐射与 PAM 联用对污泥过滤性能的影响

R_{sf} (specific resistance to filtration, 污泥比阻) 是反映污泥过滤性能的综合指标, R_{sf} 值越大, 污泥脱水性能越差。由图 2 可以看出, 在初始阶段, 随着污泥投加量和微波辐射的变化, 污泥比阻明显降低, 特别在微波辐射时间为 50 s、PAM 投加量为 4 mL 时, 污泥比阻由原泥的 5.42×10^9 降至 $0.35 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 达到容易过滤脱水污泥比阻范围。且真空抽滤后污泥含水率由 94.19% 降至 83.18%。适宜的联用技术可使污泥的脱水性能得到明显的改善。

适宜的微波辐射通过高频电磁场作用引起带负电污泥颗粒的加速运动、相互碰撞, 促使污泥结构脱稳, 同时, 短时间的微波辐射引起污泥中的温度梯度, 破坏结合水与 EPS 之间的结合力。Neher 等^[10]发现“细胞离子通道”学说, 并证明细胞因外部电磁场的作用会导致细胞壁机械性破裂。

结合以上研究成果, 认为适宜的微波辐射可

以破坏污泥的絮体结构,使污泥絮体中的部分结合水及间隙水溶出,结合 PAM 调理可使污泥脱水性能得到明显改善.

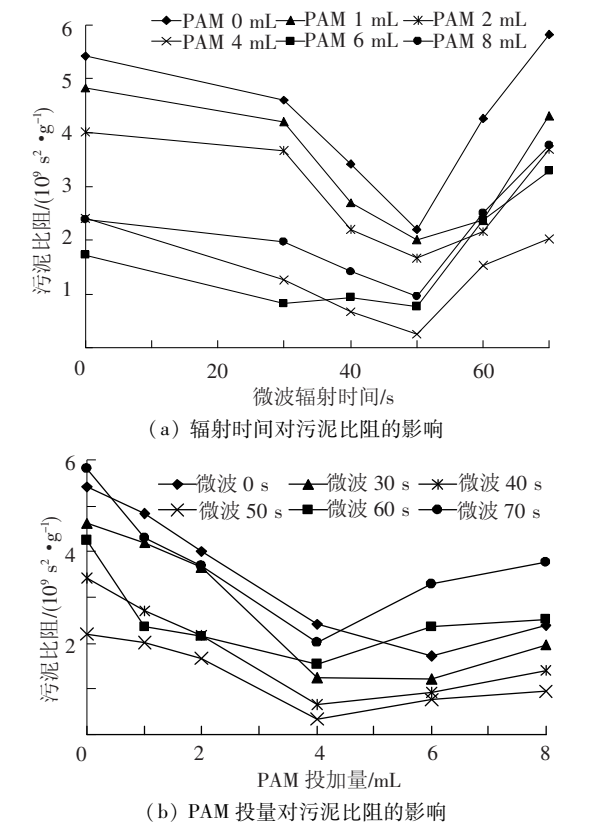


图 2 污泥辐射时间和 PAM 投加量对污泥比阻影响

2.3 微波辐射与 PAM 联用对离心后污泥含水率的影响

对污泥样品进行处理后,将污泥在 2 500 r/min 的转速下离心 5 min,测定离心后污泥的含水率.由图 3 可以看出,随着微波辐射时间增加和 PAM 投加量的增大,离心后污泥的含水率表现出先急剧减小、然后慢慢增加的规律.离心后污泥含水率由原泥的 87.86% 降至 80% 左右,其中微波辐射 50 s 时,各曲线的污泥含水率都最低.而 PAM 投加量为 4 mL 时,联用曲线的含水率也都为最低.说明适宜的微波和 PAM 联用条件可明显改善污泥的脱水性能.

2.4 微波辐射与 PAM 联用对污泥 t_{cs} 的影响

污泥毛细吸水时间 (t_{cs}) 可全面表征污泥脱水性能,因其测定简便、快速,广泛应用于污泥脱水性能的测定.由图 4 可以看出,经过联用处理后,污泥 t_{cs} 由原泥的 84.7 s 降为 40 s 左右.其中微波辐射 50 s 时,各曲线的污泥 t_{cs} 都最低.而 PAM 投加量为 4 mL 时,联用曲线的 t_{cs} 也都为最低.但随着辐射时间和 PAM 投加量的增加, t_{cs} 有上升趋势.由 t_{cs} 值变化规律可知,联用后污泥的 t_{cs} 大幅度降低,污泥脱水性能得到明显改善.

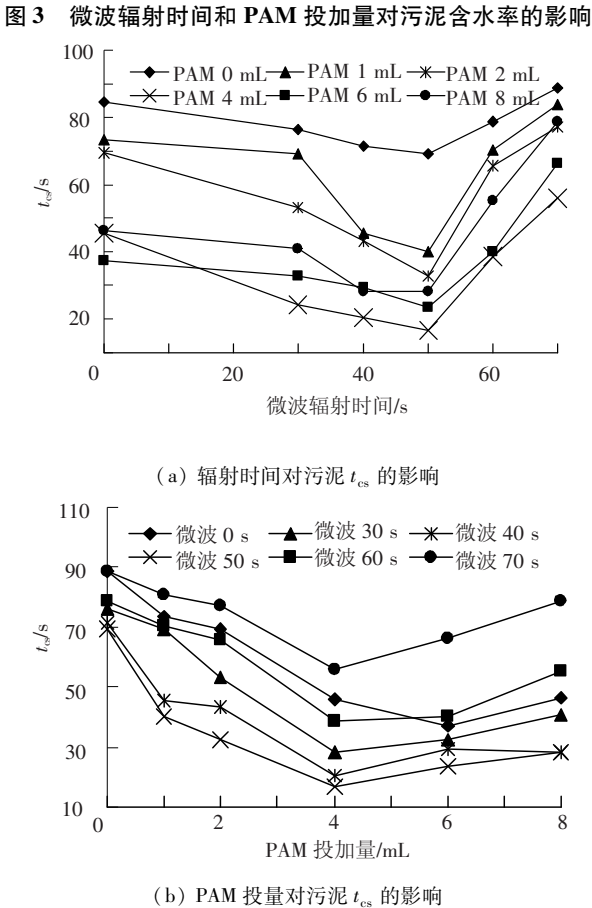
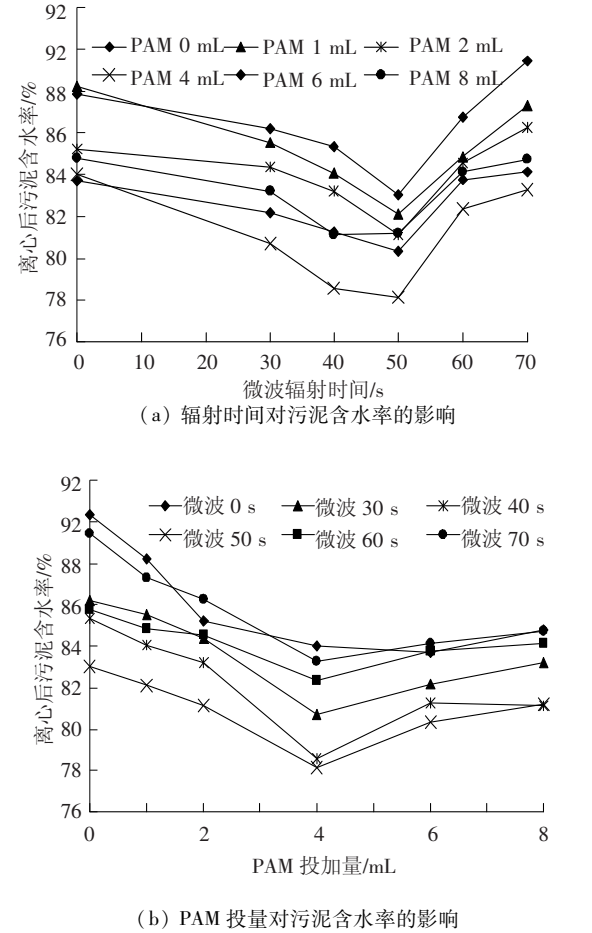


图 4 微波辐射时间和 PAM 投加量对污泥 t_{cs} 的影响

2.5 微波对污泥絮体结构的影响

胞外聚合物 (EPS) 普遍存在于剩余污泥内, 其主要成分为多糖和蛋白质, 两者的 TOC 占整个 EPS 的 70% ~ 80%^[11-12]. EPS 分子可以从细胞表面伸展出来, 阻碍细胞之间的亲密接触, 形成密实的凝胶, 阻止结合水从凝胶的微孔挤出, 所以, EPS 的存在使脱水性变差^[13-15]. 同时, EPS 是高度亲水的胶团, 包括溶解性 EPS 和结合性 EPS, 导致污泥高黏度^[16].

本试验 EPS 以多糖和蛋白质质量分数来表征^[17]. 取污泥离心后的上清液为研究对象, 测定上清液中蛋白质、糖类和核酸的质量浓度并测定离心后污泥残渣中 EPS 的含量. 其中多糖采用苯酚-硫酸法测定^[18], 蛋白质采用 Folin-酚试剂法测定^[19], 核酸采用二苯胺法测定^[20].

如图 5、6 所示, 随着辐射时间的增加, 上清液中多糖和蛋白质在 40 ~ 50 s 时明显增加, 而在 EPS 中其质量分数均明显减少. 核酸质量分数变化不明显, 表明此时主要是污泥 EPS 结构被破坏, 少量细胞破解. 随着辐射时间进一步增加, 核酸质量分数及上清液中多糖和蛋白质的质量浓度随之迅速增加, 此时细胞大量破解, 胞内物质大量流出. 结合上文污泥脱水效果表明, 短时间内微波改善污泥脱水性能的原因主要是破坏污泥絮体 EPS 结构, 使其中的结合水释出, 污泥颗粒间距增大, 再协同调理剂, 加速了结合水的释出速率, 改善了污泥的脱水性能. 而长时间微波后, 污泥脱水性能恶化归因于高速旋转的电磁场使污泥中大量微生物细胞壁破裂, 胞内物质大量流出, EPS 增加重新包裹结合水, 加之污泥絮体过度破坏, 污泥颗粒变细小, 不利于污泥脱水. 这与 Jin 等^[21]认为 t_{cs} 与 EPS 中的蛋白质和多糖呈负相关性^[5]的研究成果一致.

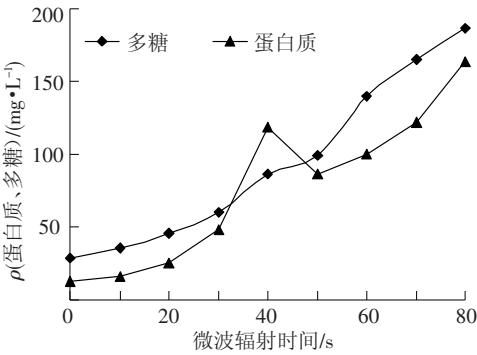


图 5 上清液中蛋白质和多糖变化

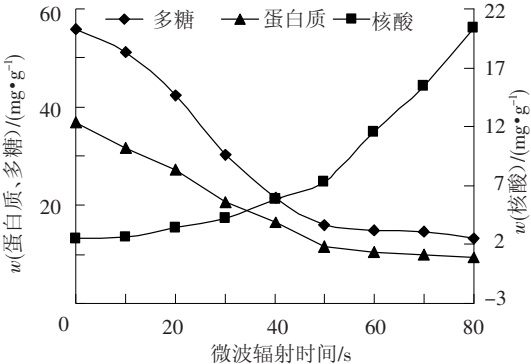


图 6 EPS 中蛋白质、多糖及核酸变化

2.6 最佳联用条件确定

双因素方差分析结果如表 1 所示. 为简便起见, 假设微波加载时间和 PAM 投加量之间无相互影响 (取均值), 且因素 A 为 PAM 投加量, 因素 B 为微波辐射时间. 由于污泥 t_{cs} 、含水率及污泥比阻的 F_A 、 F_B 值均远远大于 $F_{0.01}(5, 25) = 3.85$, PAM 投加量和微波辐射时间对污泥脱水性能均有显著影响. 因此, 选取 A、B 的最优联用条件为: 先对污泥进行 50 s 微波辐射 (2 450 MHz, 700 W), 再投加 PAM 4 mL (1 g/L, 100 mL 污泥), 污泥的脱水性能最优. 污泥的 t_{cs} 、离心后含水率及污泥比阻分别由原泥的 84.7 s、87.86%、 $5.42 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 16.7 s、78.16%、 $0.35 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. 污泥脱水性能得到大幅度改善.

表 1 双因素方差分析

偏差来源	平方和			自由度	均方和			F 值		
	t_{cs}	含水率	比阻		t_{cs}	含水率	比阻	t_{cs}	含水率	比阻
因素 A	8 221.72	122.31	36.35	5	1 644.34	24.46	7.27	45.20	40.10	25.89
因素 B	6 270.98	118.07	26.37	5	1 254.20	23.61	5.27	34.48	38.77	18.78
误差	909.44	15.23	7.02	25	36.38	0.61	0.28			
总和	15 402.14	250.53	69.73	35						

3 结 论

1) 微波辐射和 PAM 联用时, 两者的联用顺序对处理效果有明显影响, 先微波辐射后 PAM 调理的联合方式明显优于先 PAM 调理后微波辐射.

2) 适宜的微波辐射能破坏污泥的絮体 EPS 结构, 污泥絮体颗粒变小、间隙增大, 使其中的结合水释出. 再协同调理剂, 加速了结合水的释出速率, 改善了污泥的脱水性能. 而长时间的微波辐射使微生物细胞壁破裂, 胞内物质大量流出, EPS

增加重新包裹结合水,加之污泥絮体过度破坏使污泥脱水性能恶化。

3)最优的联用条件为:先对污泥进行 50 s 微波辐射(2 450 MHz, 700 W),再投加 PAM 4 mL (1 g/L, 100 mL 污泥)。污泥的 t_{cs} 、离心后含水率及污泥比阻分别由原泥的 84.7 s、87.86%、 $5.42 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 16.7 s、78.16%、 $0.35 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

4)只进行 PAM 调理时最佳投加量为 6 mL,调理后污泥的 t_{cs} 、离心后含水率及污泥比阻分别为 37.3 s、83.68%、 $1.72 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$;而最优联用条件下,只需投加 PAM 4 mL,污泥指标分别为 16.7 s、78.16%、 $0.35 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。PAM 投加量降低了 33%,且处理效果更优。因此,联用技术能大大降低 PAM 投加量,提高污泥脱水效果,使污泥后续处理成本大大降低。

参考文献:

- [1] 张自杰,林荣忱,金儒霖.排水工程(下册)[M].第4版.北京:建筑工业出版社,2000.
- [2] 傅大放,蔡明元,华建良.污水厂污泥微波处理试验研究[J].中国给水排水,1999,15(6):56-57.
- [3] ANDREWS J P, ASAADI M, CLARKE B, *et al.* Potentially toxic element release by Fenton oxidation of sewage sludge[J]. Water Sci Technol, 2006, 54(5): 197-205.
- [4] WANG Jianlong, WANG Jiazhao. Application of radiation technology to sewage sludge processing: a review[J]. J Hazard Mater, 2007, 143(1/2): 2-7.
- [5] 田禹,方琳,黄君礼.微波辐射预处理对污泥结构及脱水性能的影响[J].中国环境科学,2006(4):459-463.
- [6] 尹小延,曾科,司琼磊.微波能对化学污泥脱水性能的影响[J].化工设计,2009,19(6):42-45.
- [7] 李延吉,李润东,冯磊,等.基于微波辐射研究城市污水污泥脱水特性[J].环境科学研究,2009,22(5):544-548.
- [8] COLIN F,GAZBAR S. Distribution of water in sludges in relation to their mechanical dewatering[J]. Water Research,1995(29):2000-2005.
- [9] 郑怀礼,刘克万.无机高分子复合絮凝剂的研究进展及发展趋势[J].水处理技术,2004,30(6):315-319.
- [10] NEHER E, SAKMANN B. Single-channel currents recorded from membrane of denervated frog muscle fibres[J]. Nature,1976,260:799-802.
- [11] LIU Hong, FANG H H P. Characterization of electrostatic binding sites of extracellular polymers by linear programming analysis of titration data[J]. Biotechnol Bioeng, 2002, 80: 806-811.
- [12] SPONZA D T. Extracellular polymer substances and physicochemical properties of flocs in steady and unsteady-state activated sludge systems[J]. Process Biochem, 2002, 37: 983-989.
- [13] ZHANG Tong, FANG H H P. Quantification of extracellular polymeric substances in biofilms by confocal laser scanning microscopy[J]. Biotechnol Lett, 2001, 23: 405-409.
- [14] ANDREWS S C, ROBINSON A K, *et al.* Bacterial iron homeostasis[J]. Fems Microbiol Rev, 2003, 27: 215-237.
- [15] JANGA N, REN X H, KIM G, *et al.* Characteristic of soluble microbe products and extracellular polymeric substances in the membrane bioreactor for water reuse[J]. Desalination, 2007, 202(1/2/3): 90-98.
- [16] 肖朝伦,唐嘉丽,潘峰,等.微波辐射对脱水城市污泥穿透性和脱水性的影响[J].过程工程学报,2009,11(2):215-220.
- [17] 白玲.基础生物化学实验[M].上海:复旦大学出版社,2004:52-89.
- [18] ZHANG Bin, SUN Bao Sheng, JIN Min, *et al.* Extraction and analysis of extracellular polymeric substances in membrane fouling in submerged MBR[J]. Desalination, 2008, 227: 286-294.
- [19] 李娟,张盼月,曾光明,等. Fenton 氧化破解剩余污泥中的胞外聚合物[J].环境科学,2009,30(2):475-479.
- [20] SUNIL S, LEE D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154: 1120-1126.
- [21] JIN B, WILÉN B M, LANT P. Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge[J]. Chemical Engineer Journal, 2004, 98: 115-126.

(编辑 刘 彤)