

$A_m O_n$ 一体化工艺的脱氮除磷功能与优化设计

周雪飞^{1,2}, 张亚雷^{1,2}, 胡茂冬³, 蒋明^{1,2}

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200444)

摘要: 基于传统污水处理脱氮除磷工艺的原理设计出一体化脱氮除磷工艺. 通过小试试验运行反应器并利用活性污泥 2D 模型对其进行设计优化. 结果表明: 反应器对生活污水中 COD_{Cr} , $\text{NH}_3\text{-N}$, 总氮和总磷的去除率分别达到 74.40%, 93.15%, 73.35% 和 33.20%. 根据实验结果建立的工艺数学模型较好地模拟出了该反应器的功能, 模型通过对反应器内厌氧、缺氧、好氧区的灵活组合可以实现对反应器的优化设计. 该工艺占地面积小, 出水能够达到国家二级排放标准, 优化后能进一步提高出水水质.

关键词: 一体化脱氮除磷工艺; 活性污泥 2D 模型; 优化设计

中图分类号: X 506

文献标识码: A

Nitrogen and Phosphorus Removal of $A_m O_n$ Integrative Process: Effect and Design Optimization

ZHOU Xuefei^{1,2}, ZHANG Yalei^{1,2}, HU Maodong³, JIANG Ming^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze Water Environment of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Environment and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: An integrated nitrogen and phosphorus removal process ($A_m O_n$) was developed based on the traditional theory of wastewater nutrients treatment process. A reactor was operated in a pilot-scale study, by using activated sludge model No. 2D (ASM2D) to optimize the process. The results show that the treatment efficiency of COD_{Cr} , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP of domestic wastewater achieved by $A_m O_n$ are up to 74.40%, 93.15%, 73.35% and 33.20% respectively. Mathematics model established based on experimental results simulated the effect of reactor well, and the combination of anaerobic/

anoxic/aerobic districts smartly could accomplish design optimization. $A_m O_n$ process occupies less space, and effluent could reach the second national discharge standard. After optimization the effluent quality can be further improved.

Key words: integrated nitrogen and phosphorus removal process; activated sludge model No. 2D; design optimization

城市污水中氮、磷等营养物质是影响人类生存环境的关键因素^[1]. 传统生物脱氮除磷工艺 (A^2/O) 存在着诸多问题, 首先, 由于实现不同功能的微生物不在各自最佳的生长条件下生长^[2], 使得在脱氮与除磷之间存在碳源竞争; 其次, 该工艺的回流比一般工艺高, 导致运行能耗大、反应设备复杂、占地面积大、投资较高等一系列问题. 而一些改进的工艺, 如 Dephanox, BCFS 等, 在脱氮除磷效果上虽有所提高, 但仍存在着反应器体积增加、投资和运行费用高等缺点^[3]. 开发经济、高效、低耗的新型脱氮除磷工艺, 成为国内外的研究焦点^[4-5].

随着一系列的活性污泥数学模型的推出^[6-8], 仿真模拟已应用于工艺的优化和运行管理. 在国外数学模拟已广泛应用于实际污水厂的设计和运行, 目前国内的研究主要集中在利用 ASM2D 模型编制污水处理工艺的计算机仿真程序或利用国外基于 ASM 系列模型的活性污泥系统仿真软件来对污水处理设备的运行进行模拟和优化^[9-10].

针对以上问题, 开发出了 $A_m O_n$ 一体化污水处理新工艺, 它突破了传统 A^2/O 工艺在空间和时间上的布置形式, 大大减少了占地面积, 简化了污水处理工艺的流程. 其中 A 代表厌氧或缺氧处理, O 代表好氧处理, 以 m, n 分别代表厌氧处理和好氧处理的

收稿日期: 2009-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20876117); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAJ08B13, 2008BAJ08B21)

作者简介: 周雪飞(1971—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为污水处理理论与技术、城市污水厂数学模拟与智能控制等.

E-mail: zhouxuefei@tongji.edu.cn

张亚雷(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为水处理理论与技术. E-mail: zhangyalei2003@163.com

量,通过改变运行条件可以灵活地控制反应“程度”.在试验研究的基础上,利用 ASM2D 模型对该工艺进行仿真模拟和优化设计.

1 实验材料和方法

1.1 A_mO_n 装置与试验

小试 A_mO_n 一体化反应器装置如图 1 所示,反应区体积为 98 L. 反应流程为:一体化反应器中间为进水管,进水经进水管首先进入厌(缺)氧区(A_m 处理区域),然后进入好氧曝气区(O_n 处理区域),好氧反应完毕后,水流出出水孔进入导流区,然后进入沉淀区.在沉淀区内进行泥水分离,比重较大的活性污泥沿着导流板下滑,通过回流缝再进入中心反应区;澄清出水由反应池的集水系统收集后流出.

试验在上海市东区水质净化厂进行,进水为厂内沉砂池出水,水力停留时间为 8 h,好氧区溶解氧(DO)质量浓度 $2\sim 4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,泥龄约 15 d,接种污泥取自二沉池回流污泥.系统稳定运行 1 个月,试验期间进水水质中物质的质量浓度 COD_cr 为 $200\sim 500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 $20\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总氮(TN)值为 $40\sim 80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷(TP)值为 $2\sim 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,悬浮物固体(SS)值为 $100\sim 200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

试验水质分析测定采用《水和废水监测分析方法》一书中的标准方法进行测定.测定项目包括进出水的 COD_cr , $\text{NH}_3\text{-N}$ 、总氮、总磷、混合液悬浮固体和溶解氧的质量浓度值以及水温、pH 值等.

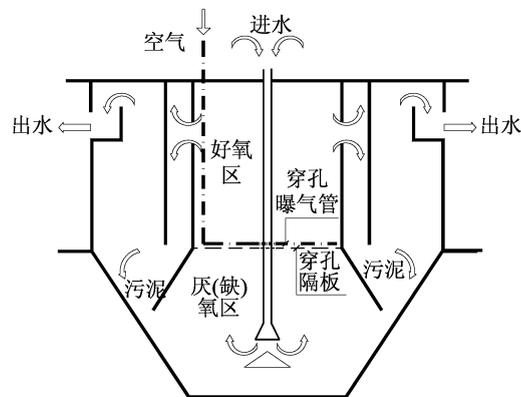


图 1 A_mO_n 一体化反应器小试试验装置示意图

Fig.1 Schematic structure of A_mO_n integrated reactor

1.2 模型建立

选用 ASM2D 模型对工艺进行模拟,利用 WEST 软件建立模型,步骤为:①从模型库中选出组件单元建立 A_mO_n 工艺,见图 2.②输入单元尺寸、流量及模型组分,根据施炜等^[11]对东区污水厂进水组分的测定,各组分比例见表 1.③稳态模拟.④动态模拟.⑤结合数据进行结果分析与参数校正^[12],得出模拟结果.

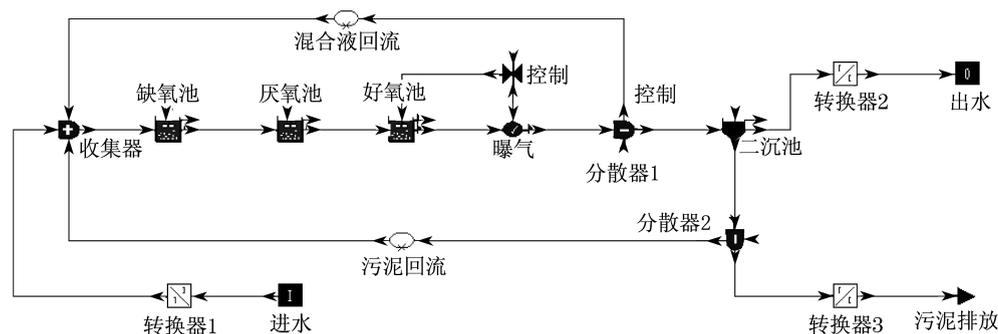


图 2 WEST 软件构建 A_mO_n 工艺

Fig.2 Constitution of A_mO_n process by WEST software

表 1 模型进水组分比例

Tab.1 Composition of model influent %

组分	测定比例	典型比例
易生物降解有机物	17.4	11.5
发酵产物	12.2	7.7
惰性溶解性有机物	11.8	11.5
惰性颗粒性有机物	10.9	9.6
慢速可降解基质	47.6	48.1
异养菌	10.8	11.5
硝化菌	0.3	

1.3 优化设计

A_mO_n 反应器由于受限于其结构,同步脱氮除磷效果不稳定.为此,对反应器进行优化设计,优化方法为:①对反应器运行进行数值模拟,得出与实际出水相符的模拟结果;②改变非曝气区与曝气区的比例、内外回流比等,优化单元体积及参数;③对优化后的工艺进行低温时的模拟验证和运行参数的优化,并最终确定优化方案.

2 结果与讨论

2.1 试验出水结果

反应器在厂内稳定运行 1 个月,每日取水样进行水质测定,结果如图 3 所示.

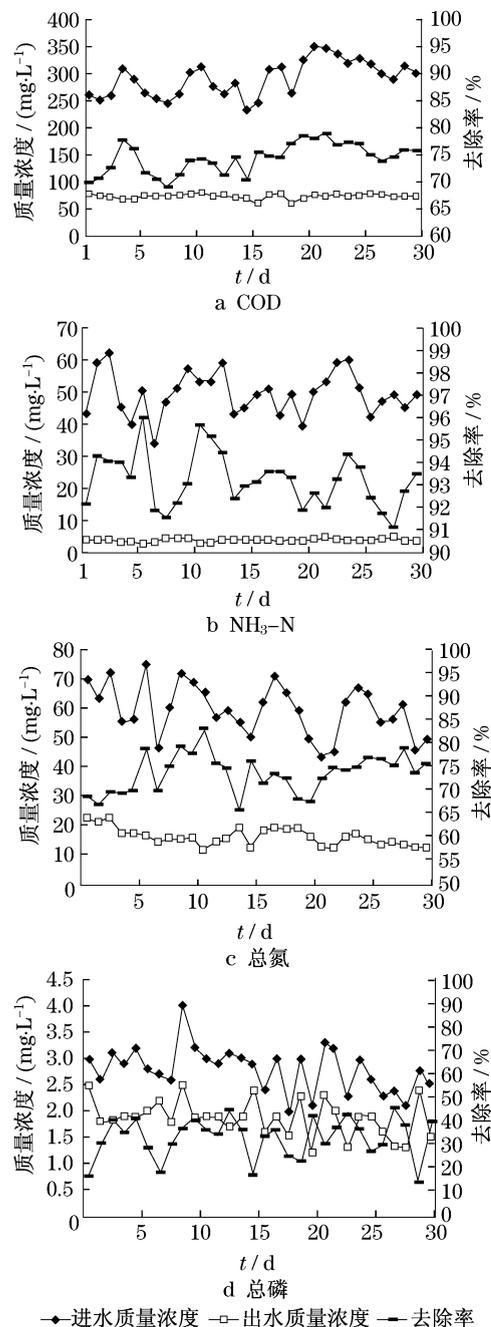


图3 $A_m O_n$ 工艺的运行效果

Fig.3 Conducted effect of $A_m O_n$ process

由图 3 知, COD, NH_3-N 、总氮、总磷的平均去除率分别为 74.40%, 93.15%, 73.35% 和 33.20%, 影响除磷的因素有污水组成、挥发酸和 pH 值等^[13], 经

分析本试验中除磷效果差与进水碳源不足有关.

2.2 初步模拟

初步模拟前假定惰性可溶性有机物和悬浮固体不参与反应, 反应阶段开始时系统中的溶解氧浓度为零并且不考虑化学除磷过程. 模拟过程中, 化学计量系数、动力学参数均采用典型值, 输入 1 组进水值后进行模拟, 结果显示: 实际及模拟出水的质量浓度 COD 为 75 和 77 $mg \cdot L^{-1}$, NH_3-N 为 4.9 和 4.6 $mg \cdot L^{-1}$, 总氮为 23 和 47 $mg \cdot L^{-1}$, 总磷为 3.2 和 3.4 $mg \cdot L^{-1}$.

从初步模拟结果可看出, COD 和总磷的模拟值与实际值基本相吻合, 而 NH_3-N 质量浓度值略小于实际值, 总氮质量浓度值则大于实际值, 因此需对模型中的相关参数进行调整.

2.3 模型校正

2.3.1 灵敏性参数的确定及校正结果

根据以往研究者对模型参数影响的研究, 异养菌产率系数 Y_H 影响到污泥产率和需氧量的计算, 对 COD 有重要的影响. 随着 Y_H 的增加, 总耗氧速率降低, 异养微生物的产率高, 生成单位量的微生物所消耗的有机物少, 出水 COD 质量浓度提高; 硝化菌产率系数 Y_{AUT} 对出水总氮有着较重要的影响. 以此为基础, 通过现场实验研究, 确定出灵敏性参数及典型组分比例范围. 根据文献[14-15], 取 Y_H 为 0.65、 Y_{AUT} 为 0.25 作为调整值对模型进行校正. 对一些关键参数进行调整后, 利用校正后的模型对 30 d 的试验数据进行模拟, 结果见图 4.

2.3.2 模型验证

比较模拟平均值与试验平均值, 结果见表 2.

从结果来看, 模拟 COD_{Cr} 的值相对误差仅为 4.6%; CH_3-N 和总磷的相对误差为 9.5% 和 7.0%. 而总氮的相对误差为 34.4%, 但也反映了变化趋势, 相对误差为 34.4%. 经分析, 总氮的值产生差距是由于反应器中的厌氧、缺氧、好氧区的划分与模型中比例有分歧及模型中很多参数采用典型值所致.

2.4 工艺优化

2.4.1 工艺设计优化

通过在模型中改变反应器内厌氧、缺氧、好氧区的体积比对工艺进行优化. 试验中反应器内厌氧区与沉淀区混合, 故取沉淀区体积为零, 而优化设计中设反应区与沉淀区分开. 优化结果见表 3~4.

由表 4 可以看出, 增加好氧区的体积, 出水氨氮的质量浓度有所下降, 但缺氧区体积的减少导致反硝化能力不足, 使总氮、总磷的质量浓度上升. 当厌氧、缺氧、好氧区体积比为 1:1:2 时, 对氮磷的去

除效果较好,因此最终确定第 3 种优化方案为最佳方案.

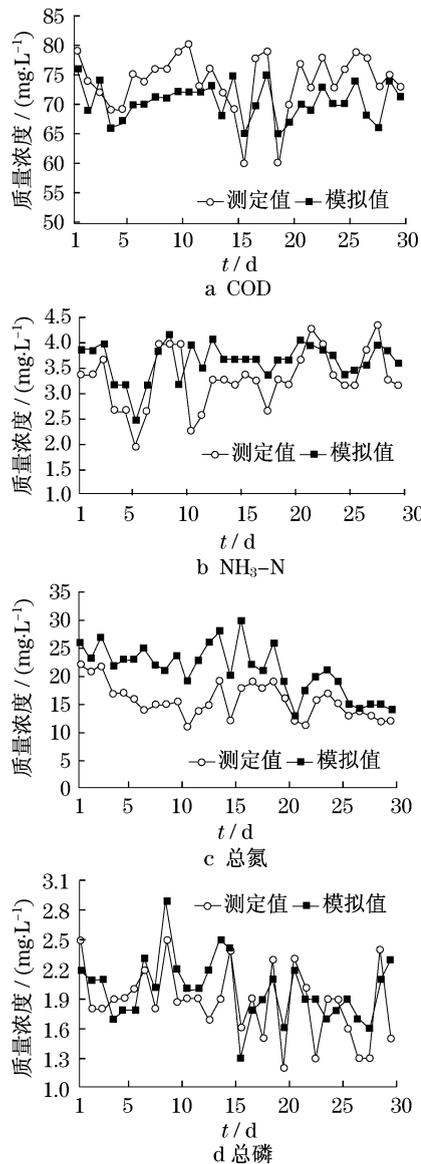


图 4 试验与模拟值比较

Fig.4 Comparison of simulated value and experimental value

表 2 出水水质比较

Tab.2 Comparison of effluent quality

物质	试验质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	模拟质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	相对误差/ %
COD_{Cr}	73.83	70.43	4.6
$\text{NH}_3\text{-N}$	3.32	3.67	9.5
总氮	15.70	21.11	34.4
总磷	1.87	2.00	7.0

2.4.2 低温校核

调整模型在低温($10\text{ }^\circ\text{C}$)条件下运行,结果见

表 5. 此时出水 COD 质量浓度值略有上升,由于硝化反应减慢, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和总氮的值上升较大,总磷的值也有所上升. 为提高硝化效果,将好氧池溶解氧质量浓度升至 $4\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并扩大好氧区体积至大于等于 50 L.

表 3 A_mO_n 反应器各区体积的不同优化设计方案

Tab.3 Different design optimization schemes of every district volume in A_mO_n reactor

设计方式	厌氧区	缺氧区	好氧区	沉淀区
试验设计	28	28	42	0
模拟取值	28	28	42	0
设计方法 1	24	24	24	26
设计方法 2	14	14	42	28
设计方法 3	21	21	42	14
设计方法 4	14	14	56	14
设计方法 5	28	28	14	28

表 4 A_mO_n 工艺不同设计方法的模拟出水质量浓度

Tab.4 Effluent concentration of A_mO_n process under different design optimization schemes

设计方式	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$
试验设计	74.00	3.32	15.70	1.90
模拟结果	70.43	3.67	21.11	2.00
设计方法 1	70.50	3.86	26.00	2.07
设计方法 2	70.60	3.63	22.50	2.06
设计方法 3	70.03	3.55	20.50	2.00
设计方法 4	70.20	3.53	29.10	2.07
设计方法 5	70.60	3.96	24.70	1.89

注: ρ 为质量浓度.

表 5 低温时运行结果和改变参数后模拟出水质量浓度

Tab.5 Modeling effluent under the altered parameters and operational results at low temperature

运行条件	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$
低温 $10\text{ }^\circ\text{C}$	77.0	5.3	33.0	2.4
提高 DO 至 $4\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	70.0	4.0	25.0	2.1
好氧区体积不小于 50 L	68.9	3.9	21.0	2.1

由表 5 可知,在低温时出水水质较差,提高 DO 质量浓度和扩大好氧区体积后,水质有所提高,因此在低温条件下运行时可采用增加曝气量和扩大好氧区体积等措施来提高出水水质.

2.4.3 运行参数优化

由于 A_mO_n 反应器在其内部自动回流,易受到曝气区污泥浓度的影响.而在优化模型中,设定混合液

回流比为200%、污泥回流比为90%。通过改变模型中的回流比对工艺进行模拟,结果表明,当混合液回流比在100%~200%之间变化时,总氮值从 $29.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐下降到 $20.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷从 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐下降到 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,为保证去除效果,使混合液回流比大于等于200%为宜;当调整污泥回流比低于50%时,总氮、总磷质量浓度明显上升。故污泥回流比应保持大于等于50%才能满足要求。

3 结论

(1) $A_m O_n$ 一体化反应器占地面积小,有着很高的回流比,厌氧、缺氧、好氧区体积比可以灵活控制,稳定运行出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和总氮质量浓度值达到国家一级B排放标准, COD_{cr} 、总磷质量浓度值达到二级标准。脱氮除磷效果受非曝气区与曝气区体积比的影响。

(2) 利用WEST软件模拟 $A_m O_n$ 一体化装置的运行,模拟得出的出水水质中 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和总磷的质量浓度值与试验测定值基本相合,总氮的模拟值也反映出了出水变化情况。利用ASM2D模型较好地模拟出水水质参数情况,可对 $A_m O_n$ 一体化反应器的运行进行有效的仿真模拟及优化设计。

(3) 通过模型对反应器内的结构进行优化设计,得出最佳运行条件为厌氧、缺氧、好氧区体积比为1:1:2;在低温运行时可通过提高溶解氧质量浓度和增大好氧区体积来满足出水要求;通过调整回流比实现了运行参数的优化。

参考文献:

- [1] Patel A, Zhu J, Nakhla G. Simultaneous carbon, nitrogen and phosphorous removal from municipal wastewater in a circulating fluidized bed bioreactor[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(7):1103.
- [2] Vaiopoulou E, Melidis P, Aivasidis A. An activated sludge treatment plant for integrated removal of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. *Desalination*, 2007, 21(1):192.
- [3] 高廷耀,夏四清,周增炎.城市污水生物脱氮除磷工艺评述[J]. *环境科学*, 1999, 20(1):110.
GAO Tingyao, XIA Siqing, ZHOU Zengyan. Summary on the technologies of biological nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1999, 20(1):110.
- [4] Lesjean B, Gnirss R, Adam C. Process configurations adapted to membrane bioreactors for enhanced biological phosphorous and nitrogen removal[J]. *Desalination*, 2002, 149(1/3):217.
- [5] QIAN Y, WEN X, HUANG X. Development and application of some renovated technologies for municipal wastewater treatment in China [J]. *Front Environmental Science Technology*, 2007, 1(1):1.
- [6] Gujer W, Henze M, Mino T, et al. The activated sludge model no. 2: biological phosphorus removal[J]. *Water Sci Technol*, 1995, 31(2):183.
- [7] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated sludge model no. 2D, ASM2D [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(1):165.
- [8] Gujer W, Henze M, Mino T, et al. Activated sludge model no. 3 [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(1):183.
- [9] 郭亚萍,顾国维. ASM2d在污水处理中的研究与应用[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(6):8.
GUO Yaping, GU Guowei. Study and application of ASM2d in wastewater treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(6):8.
- [10] 揭大林,操家顺,花月,等. WEST仿真软件在污水处理中的应用研究[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(3):138.
JIE Dalin, CAO Jiashun, HUA Yue. Application research of WEST software to sewage treatment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(3):138.
- [11] 施炜. 活性污泥法脱氮除磷工艺的优化设计研究[D]. 上海:同济大学环境科学与工程学院, 2008.
SHI Wei. Research on optimum design of activated sludge nutrient removal process [D]. Shanghai: Tongji University. School of Environmental Science and Engineering, 2008.
- [12] 郭亚萍,顾国维. WEST软件的仿真设计功能应用研究[J]. *工业水处理*, 2006, 26(3):80.
GUO Yaping, GU Guowei. Simulated software, based on ASMs for wastewater treatment plants [J]. *Industrial Water Treatment*, 2006, 26(3):80.
- [13] Mulkerrins D, Dabson A D W, Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters [J]. *Environment International*, 2004, 30(2):120.
- [14] 黄勇,杨铨大. 生物处理动力学参数测定研究[J]. *中国环境科学*, 1996, 16(2):123.
HUANG Yong, YANG Quanda. Kinetic parameters estimation for biological treatment process modeling[J]. *China Environmental Science*, 1996, 16(2):123.
- [15] 甘立军,刘建勇,顾国维. ASM1中化学计量系数的测定与计算[J]. *中国给水排水*, 2003, 19(1):79.
GAN Lijun, LIU Jianyong, GU Guowei. Mensuration and calculation of stoichiometric parameters in ASM1 [J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(1):79.