

CAST 技术现状与发展

王少坡¹, 孙力平¹, 于静洁¹, 彭永臻²

(1. 天津城市建设学院 环境与市政工程系, 天津 300384; 2. 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘 要: 简要介绍了循环式活性污泥法 (CAST) 的运行机理及其在国内外的应用和发展状况, 并分析了该工艺的技术特点、存在的问题及其发展方向。CAST 工艺是可变容积活性污泥法过程与生物选择器原理有机结合的产物, 具有优异的脱氮除磷功能。随着计算机、自动化技术的发展, CAST 工艺的运行控制将更灵活, 优势将更为突出。

关键词: 循环式活性污泥法; 生物选择器; 硝化反硝化; 生物除磷; 智能控制

1 前言

循环式活性污泥技术 (CAST, Cyclic Activated Sludge Technology) 由 Goronszy 教授于 1965 年在澳大利亚开始研究, 1978 年, Goronszy 教授利用活性污泥基质积累再生理论, 根据基质去除与污泥负荷的实验结果以及污泥活性组成和污泥呼吸速率之间的关系, 将生物选择器与序批式活性污泥法工艺加以有机结合, 开发成功循环式活性污泥法, 并于 1984 年和 1989 年分别在美国和加拿大取得 CAST 工艺的专利^[1]。由于其投资和运行费用低、处理性能高, 并以其优异的脱氮除磷功能而得到越来越多的重视。如今, 该技术已经广泛应用于德国、英国、北美、亚洲部分地区和澳大利亚等地区的城市污水和多种工业废水处理工程当中, 目前世界上已建成 300 余座采用 CAST 工艺的污水处理厂。国内对 CAST 的研究和应用从 90 年代开始, 目前该工艺在国内主要应用于生活污水处理以及啤酒废水、制药废水、洗毛废水等工业废水的处理。

2 CAST 简介

2.1 工艺组成及运行

CAST 工艺的主体为一间歇式反应器, 在此反应器中活性污泥法过程按曝气和非曝气阶段不断重复, 将生物反应过程和泥水分离过程结合在一个池子中进行, 废水按一定的周期和阶段得到处理。根据生物反应动力学原理, 使废水在反应器内的流动呈现出整体推流而在不同区域内为完全混合的复杂流态, 保证了稳定的处理效果。一个 CAST 反应池一般包括三个分区: 第一区 (生物选择器)、第二区和第三区 (主反应区)。生物选择区设置在反应池前端, 从主反应区回流来的污泥和流进的污水在此混合。此区内水力停留时间一般在 0.5 ~ 1 h 之间, 通常在厌氧或兼氧条件下运行。第二区不仅具有辅助厌氧或兼氧条件下生物选择的功能, 还具有对进水水质水量变化的缓冲作用。主反应区则是最终去除有机底物的主要场所, 运行过程中, 通常对主反应区的曝气强度加以控制, 使反应区内主体溶液中处于好氧状态, 而活性污泥结构内部则基本处于缺氧状态。处理生活污水时^[2], 三个区参考容积比可选择为 1:2:17。

CAST 工艺一个循环过程一般包括四个阶段, 即进水曝气阶段、沉淀阶段、滗水阶段、闲置阶段, 一般其一个运行周期为 4 h, 其中进水曝气占 2 h, 沉淀、滗水各占 1 h, 图 1 为该工艺一个典型的循环过程。进水曝气阶段, 反应器内的水位随进水而由初始的设计最低水位逐渐上升至最高设计

水位, 因而其有效容积是逐渐增加的 (即变容积运行)。曝气阶段结束后, 在静止条件下使活性污泥进行絮凝沉淀, 沉淀结束后通过表面滗水装置排出上清水层, 并使反应器中的水位恢复设计最低水位, 然后重复上一周期的运行。为保证系统在最佳条件下运行, 需定时排泥, 主反应区内混合液污泥浓度 (MLSS) 在 $3500 \sim 5000 \text{ mg/L}$ 时, 经过沉淀后可达到 15000 mg/L 左右, 剩余污泥量要比传统活性污泥处理工艺少得多^[3]。

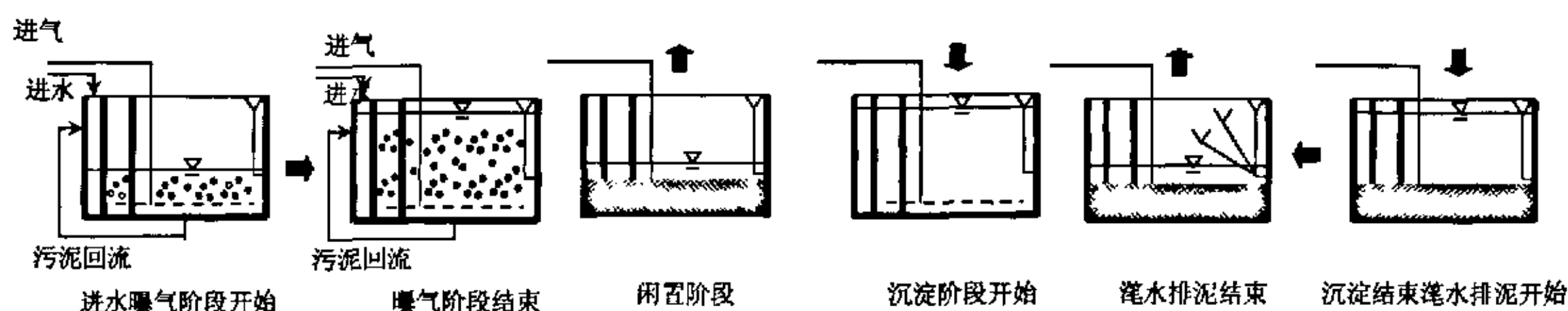


图 1 CAST 运行过程示意图

2.2 污染物去除机理

CAST 系统的一个重要特性是, 在工艺中不设机械搅拌的情况下, 通过设立生物选择器, 调节曝气强度和循环时间, 可以使工艺高效地去除氮磷^[4]。在曝气阶段, 控制供氧强度以及曝气池中溶解氧浓度, 使活性污泥絮体的外缘在好氧环境下进行硝化; 由于氧在污泥絮体内部的渗透传递作用受到限制, 而较高的硝酸盐浓度则能较好地渗透到絮体内部, 从而有效地进行反硝化。在曝气条件下, 由于通过生物吸附积累了足够的碳源来用于反硝化, 污泥絮体内反硝化进行的较彻底。此外, 通过污泥回流, 部分硝酸盐被带入池首的生物选择器中也可得到反硝化。

生物选择器基本上在缺氧-厌氧条件下运行, 由于高有机负荷的存在, 该区内活性污泥的活性最高。该区通过酶反应机理快速去除废水中的可降解溶解性有机物质, 有机底物被转化为微生物细胞内物质, 如糖原质、多羟基丁酸盐等, 然后转化为外部细胞蛋白质复合物 (该物质使得活性污泥具有粘性絮状的性质)。厌氧微生物较高的生物活性使得生物选择器内氧化还原电位 (ORP) 迅速降低, 从主反应区回流来的污泥, 其中剩余的硝酸盐在此进行反硝化, 同时由于其大量活性污泥的网捕作用, 还可以去除溶液中的悬浮物。生物选择器内的污泥浓度决定于从第三区回流来的污泥浓度和进水速率, 其容积大小可根据活性污泥的絮体负荷 (S_o/X_o , 基质浓度与微生物浓度之比) 来确定^[5], 以使最大程度地去除易降解可溶性有机底物。生物选择器内的微生物处于高有机底物浓度的环境, 使得絮状微生物处于支配地位, 而抑制了丝状菌的生长。值得注意的是, 该区回流污泥量为进水流量的 20%, 与其他恒定容积连续流系统相比要低很多, 因此能耗也相对较低。

第二区和三区微生物通过供氧调节, 反复经过缺氧—好氧—厌氧状态, ORP 约在 $-150 \sim 100 \text{ mV}$ 之间, 此时, 二区、三区 (非曝气时) 的污泥层内和生物选择器内进行磷的释放。曝气时, 第二区内的微生物进行近似于好氧的反应; 停止曝气时, 则进行近似于厌氧的反应。在曝气停止的阶段内, 污水中可降解挥发性固体水解为可转化为醋酸盐等可溶性有机物。第三区内溶解氧浓度控制在 $0 \sim 2.5 \text{ mg/L}$ 之间, 以确保进行同步硝化反硝化 (co-current nitrification and denitrification) 及磷的吸收^[6]。在非曝气阶段, 磷在污泥内进行释放, 同时污泥吸附的可降解的挥发性固体进行水解。在曝气阶段, 第二区经历了一个有机负荷比主反应区高的反应阶段, 两个区采用同样的曝气强度, 以加强同步硝化反硝化的进行和磷的吸收与释放。图 2 所示为澳大利亚 Rottneest Island 的一个采用 CAST 工艺的污水厂在 2 h 进水曝气阶段氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝酸氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 和溶解氧 (DO) 浓度的典型变化情况。

2.3 工艺控制

CAST 工艺之所以得以广泛重视和应用的原因之一, 在于自动化技术的快速发展及应用。CAST 工艺的一个显著特点是程序工作制, 因此, 可以方便的实现以时间程序控制为目的的可编程控制(PLC)等模块化自动控制。目前, CAST 工艺可根据要求实现部分自动化或完全自动化控制。例如, 可通过在线测量耗氧速率来调节工艺运行, 控制供氧强度和曝气时间, 使工艺稳定运行; 自控系统能将工艺过程中产生的剩余污泥量自动予以排除, 在每一循环中, 排除剩余污泥的时间可以按设计的污泥龄和池中污泥浓度而预先设定。沉淀阶段结束后, 移动式滗水堰自动将上清液排出系统。整个过程可完全自动进行, 从而大大地简化了工艺操作、减少了操作人员数量。如需要对进水碳氮磷比例或 pH 等进行调整, 则可根据所测得的流量和水质自动投加氮磷或酸碱等物质^[7]。

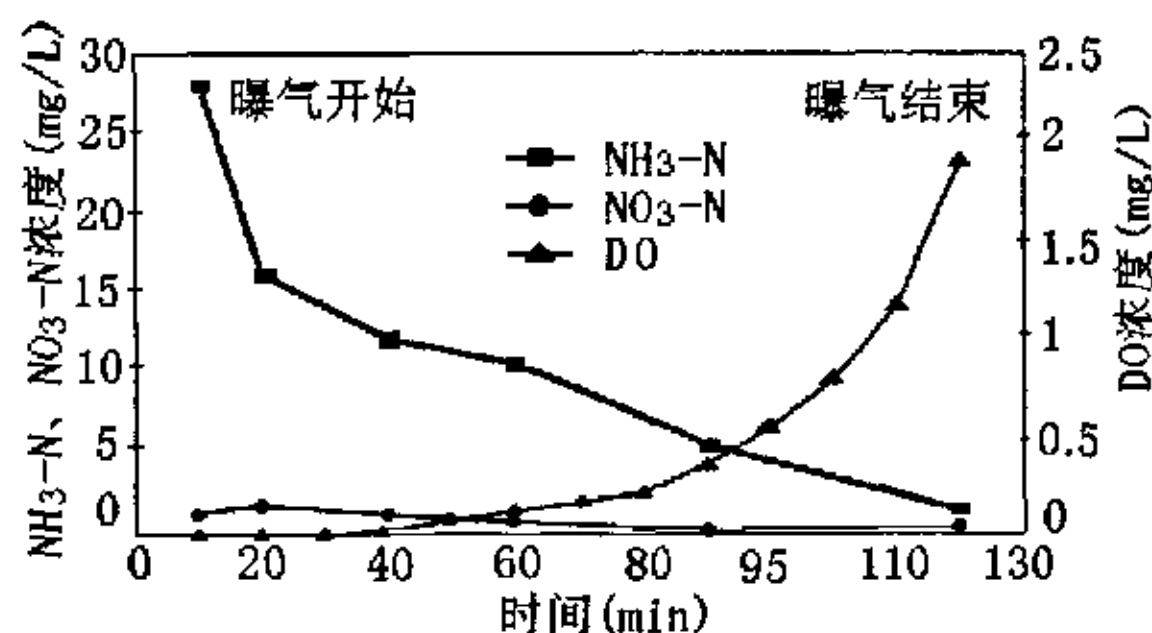


图2 进水曝气阶段 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DO 浓度变化

模块化自控技术虽然实现了控制系统的标准化、模块化, 但通常情况下其自控系统仍属于程序化的自动控制, 而实际运行中, 自控系统应该根据系统的运行过程中相关参数的变化, 及时自动调整系统的运行状态, 使系统一直保持一个最佳的状态, 这就需要具有智能化的过程控制系统, 即将系统运行过程中的各种相关因素作为逻辑变量进行判断和计算, 确定出最佳的控制方案并自动执行, 使系统达到优化运行的目的。例如在 CAST 工艺中, 为了加强反硝化的进行, 需要调节曝气强度来控制氧化还原电位, 可采用溶解氧传感器在线检测溶液中的溶解氧浓度, 通过变频装置来自动调节风机曝气速率^[8], 从而降低能耗。目前的污水处理工程中, 真正全部采用智能控制的自控系统较少, 基本上还都是以程序控制为主, 智能控制将是今后污水处理自控技术发展的方向。智能控制技术在污水处理工程中的实现, 将会使得 CAST 工艺的优势更加突出, 应用前景更为广阔。

3 工艺发展

为了在大规模污水厂中应用及更好地实现同步硝化反硝化, G Demoulin 等人在以下几个方面对 CAST 工艺进行了改进, 并在德国的波茨坦 (Potsdam, 德国北方城市) 污水处理厂得到应用^[9]:

- ① 采取较短的运行周期 (4 h 或更短), 用隔板在池内设立生物选择器, 调节进水程序和控制曝气强度, 以抑制污泥丝状菌膨胀并实现同步硝化反硝化, 调节氧化还原电位以实现强化生物除磷 (EBPR, enhanced biological phosphorus removal)。
- ② 采用呼吸速率作为工艺控制的参数, 可以实现对微生物新陈代谢活动的长期控制, 从而改变以时间为基础的控制为以需氧量为对象的工艺控制。
- ③ 采用较高的处理水滗除速率, 滗水深度短时间内可达 2.5 m。
- ④ 建立正常流量和高峰流量两套可调节运行的方案。

此外, 在生物选择器运行方式的选择上, 可以维持好氧、厌氧或者缺氧的运行条件, 也可在三

种状态交替转换下运行；可变容积运行，也可定容积运行，可根据具体水质和处理要求经过试验进行确定。以上改进措施始于澳大利亚，后来逐渐应用于北美、中欧等地区。

考虑到 CAST 工艺运行中，通过回流污泥至生物选择器与废水混合实现磷的释放，而硝化作用在主反应区内进行，回流污泥中必然含有较高的硝态氮，将对磷的释放造成影响，降低除磷效率。潘杨，黄勇等人通过设置前段生物膜硝化区^[10]，并使硝化区与生物选择器相互独立，同时缩短主反应区的污泥龄，以达到提高系统脱氮除磷效率的目的。但污泥龄的缩短使得活性污泥细胞能量水平较高，可能导致污泥难于沉降，因而改进 CAST 系统的污泥沉降性能对保持稳定的脱氮除磷效果至关重要。在此改进思路下，潘杨等人进行了一系列的小试实验研究，结果表明，系统运行稳定，脱氮效率大于 80%，磷的去除率在 85% 以上。

国内张统等人结合研究结果和实际经验，提出了一种新型的 CASS (Cyclic Activated Sludge System) 工艺：连续进水周期循环曝气活性污泥法^[11]，并对该工艺在处理制药废水、低温下处理生活污水等方面进行了研究。与传统的 CAST 工艺不同的是，该工艺没有污泥回流，反应池仅设两个区：预反应区和主反应区，预反应区控制在缺氧状态，以提高难降解有机物的去处效果；另外一个显著的特点是该工艺采用连续进水，单个池子即可独立运行，为大规模应用提供了条件，同时也降低了工艺控制的复杂性。该工艺已经在北京航天城、北京第三制药厂等污水处理工程中得到应用。

4 应用实例

德国的波茨坦污水厂设有四个半圆形水池，每两个组成一个直径为 52.5 m 的圆形结构。每个池子之中都设有生物选择器，经过初级沉淀的生活污水和从主反应区回流来的污泥进入生物选择器，在这里混合后进入下一处理阶段。工艺运行周期在干旱季节为 4 h，在多雨季节则采用 3 h 的“紧急”(emergency)运行周期。每个周期各阶段的时间安排都以保证强化生物除磷和同步硝化反硝化的实现为目的。该污水厂设计处理水量旱季 1300 m³/d，雨季水量 2500 m³/d，原水 COD 为 420 mg/L，总氮为 93 mg/L，总磷为 13 mg/L；处理出水要求 COD<75 mg/L，TP<2 mg/L，TN<18 mg/L。

回流到生物选择器的污泥量不超过旱季进水量的 30%。污水在生物选择器内靠隔板来进行水力混合。在该区内磷进行释放，同时有少量的反硝化发生。图 3 为一个周期内反应池中 DO 和 ORP 随时间的变化情况。

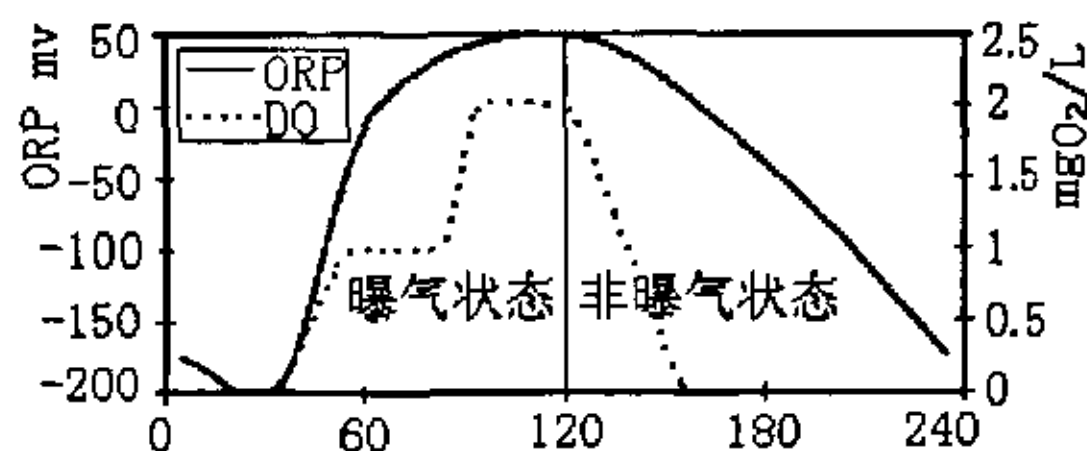


图 3 一个周期(4h)内 ORP 和 DO 的变化

工艺运行中采用了呼吸速率测定技术，用以监测工艺的稳定性，同时起到在线优化工艺运行的作用。反应池内没有发生由于氮气气泡而引起的污泥上浮现象，这是因为采用的运行周期短，每一个循环周期内只有少量的氮气产生。

波茨坦污水处理厂低温下的运行结果表明，在没有机械搅拌设备的情况下，采用在线监测污泥呼吸速率，反应池内实现同步硝化和反硝化，氮的去除率达到 90%~92%。15℃时，硝化速率达到 1.1 mgN/gMLSS·h。在一个周期内 2 小时曝气的条件下，反硝化速率达到 0.85 mgN/gMLSS·h，经过

对比一天内进水中的变化和工艺的反硝化速率变化, 结果表明, 除了进水中 TN 含量外, 其他外界因素对于反硝化速率没有明显的影响, 当进水中 TN 含量增高时, 反硝化速率也相应地增加。例如, 当进水的平均 COD/TN 为 8:1 时, 反硝化速率达到 0.85 mg/gMLSS·h。在没有外加药物情况下, 出水中总磷浓度变化不大, 在进水 COD/TP 为 49.7:1 时, 出水平均总磷浓度为 0.38 mg/L。此外, 反应池中最大耗氧速率 POUR 和耗氧速率 SOUR 的比值为 6:1, 说明通过形成底物浓度梯度可有效抑制丝状菌生长, 也说明 CAST 反应池具有较强的抗冲击负荷能力。

5 工艺特点

CAST 工艺的主要特点如下:

- ① 工艺流程简单, 因为没有初沉池、二沉池以及规模较大的回流污泥泵站, 所以土建和设备投资较低、占地面积较省。
- ② 有机污染物去除率高, 处理出水水质尤其是脱氮除磷效果优于传统活性污泥法。
- ③ 可变容积的运行方式, 使得工艺能较好地缓冲进水水质、水量的波动, 具有较强的抗冲击负荷能力。
- ④ 生物选择器的设置, 不仅抑制了丝状菌的生长, 还改善了污泥沉降性能, 使得工艺不易产生污泥膨胀; 沉淀过程在静止环境中进行, 无污泥上浮现象。
- ⑤ 工艺简单, 运行稳定、灵活, 无需进行大量的污泥回流和内回流, 能耗较低。
- ⑥ 自动化程度高, 管理方便, 操作维护方便。

CAST 工艺有待改进的地方有:

- ① 容积利用率较低, 一般每周期接纳污水约占总有效容积的 30%; 当生物选择器采用定容积方式运行时, 整个工艺的容积利用率将更低。
- ② 生物选择器内磷的释放易受到回流混合液中硝态氮浓度的影响, 在传统 CAST 工艺系统中, 要想进一步提高除磷效率, 就需要外加药剂进行化学除磷。

6 结语

CAST 工艺是一种高效经济的废水生物处理技术, 其工艺流程简单, 操作控制方便, 脱氮除磷效果好。通过设置生物选择器, 有效地预防了丝状菌污泥膨胀的发生, 并具有较强的耐冲击负荷的能力。相关工程技术人员还需不断努力, 以使 CAST 技术日趋完善, 随着计算机、自动化技术的发展, 智能控制的实现及其在污水处理工程中的应用, 不仅可提高工艺的运行管理水平, 还能使 CAST 工艺充分发挥其特有的优势。今后, 在城市污水、工业废水处理领域, CAST 工艺将会有更加广阔的应用和发展前景。

参考文献

- [1] M.C. Goronszy, 朱明权, K. Wutscher. 循环式活性污泥法(CAST)的应用及其发展. 中国给水排水, 1996, 12(6): 4-10
- [2] Mervyn C. Goronszy, et al. The Cyclic Activated Sludge System for Resort Area Wastewater Treatment. Water Science and Technology, 1995, 32(9): 105-114
- [3] 沈耀良, 王宝贞. 循环活性污泥系统(CASS)处理城市废水. 给水排水, 1999, 25(11): 5-8
- [4] M. C. Goronszy. Full-scale Cyclic Activated Sludge System Phosphorus Removal. Water Science and Technology, 1992, 26(9-11): 2253-2256

- [5] Mervyn C. Goronszy, et al. Aerated Denitrification in Full-scale Activated Sludge Facilities. *Water Science and Technology*, 1997, 35(10): 103-110
- [6] Gunnar Demoulin, Mervyn C. Goronszy, et al. Co-current Nitrification/denitrification and Biological P-removal in Cyclic Activated Sludge Plants by Redox Controlled Cycle Operation. *Water Science and Technology*, 1997, 35(1): 215-224
- [7] M.C. Goronszy, 朱明权, K. Wutscher. 循环式活性污泥法(CAST™)在工业废水处理中的应用. *中国给水排水*, 1997, 13: 7-12
- [8] Mervyn C. Goronszy, David Rigel. Biological phosphorus removal in a fed-batch reactor without anoxic mixing sequences. *Research Journal WPCF*, 1991, 63(3): 248-258
- [9] G. Demoulin, A. Rüdiger, M.C. Goronszy. Cyclic activated sludge technology – recent operating experience with a 90,000 p.e. plant in Germany. *Water Science and Technology*, 2001, 43(3): 331-337
- [10] 潘杨, 黄勇, 李勇. 改进的 CASS 工艺中污泥沉降性能的探讨. *苏州城建环保学院学报*, 2002, 15(3): 38-42
- [11] 张统, 等. 间歇式活性污泥法污水处理技术及工程实例. 北京: 化学工业出版社, 2002: 4-5

联系电话: 022-89400562