改良 A^2/O 分段进水工艺用于污水厂升级改造

朱云鹏[1]， 彭永臻[1,2]， 王继苗[3]， 黄东辉[4]， 祝征圣[3]， 赵 勇[4]，
王淑莹[1]， 刘 旭[1]

(1. 北京工业大学 环境与能源工程学院，北京 100124；2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院，黑龙江 哈尔滨 150090；3. 青岛开投双元水务有限公司，山东 青岛 266109；4. 江苏裕隆环保有限公司，江苏 无锡 214214)

摘 要：采用传统 A^2/O 工艺处理市政污水时出水水质很难达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准。青岛城阳污水处理厂采用改良 A^2/O 分段进水工艺进行升级改造，通过分段进水的形式强化系统对原水中碳源的利用，提高对污染物的去除能力。运行结果表明，经改良后生物池对 COD、NH_4^+ －N 和 TN 的去除率分别能够稳定维持在 86.25%、95% 和 66% 以上，最终出水平均值分别为 38、1.57 和 13.56 mg/L，满足一级 A 排放标准；对 TP 的去除率在 81.40% 以上，在深度处理时投加少量氯化铁进一步对磷进行去除，出水值也达到了一级 A 标准。经改良后，生物池出水水质在达到一级 A 标准的基础上每天可节省电耗约 672 kW·h。

关键词：A^2/O 工艺； 分段进水； 升级改造； 悬浮填料； 一级 A 标准； 节能降耗
中图分类号：X703 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4602(2012)07－0022－06

Modified Step-feed A^2/O Process for Upgrade and Reconstruction of WWTP

ZHU Yun-peng[1], PENG Yong-zhen[1,2], WANG Ji-miao[3], HUANG Dong-hui[4],
ZHU Zheng-sheng[3], ZHAO Yong[4], WANG Shu-ying[1], LIU Xu[1]

(1. *College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*; 2. *College of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150090, *China*; 3. *Qingdao Kaitou Shuangyuan Water Co. Ltd., Qingdao* 266109, *China*; 4. *Jiangsu Yulong Environmental Protection Co. Ltd., Wuxi* 214214, *China*)

Abstract: When the traditional A^2/O process is used to treat municipal wastewater, the effluent quality can hardly meet the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918－2002). The modified step-feed A^2/O process was adopted for upgrade and reconstruction of the Qingdao Chengyang WWTP. Adopting step-feeding patterns enhanced the carbon source use and the removal efficiency of pollutants. The results showed that the removal rates of COD, NH_4^+ －N and TN in the biological tank were more than 86.25%, 95% and 66%, respectively, and the average effluent concentrations were 38 mg/L, 1.57 mg/L and 13.56 mg/L respectively, meeting the first level A criteria discharge standard. The removal rate of TP was more than 81.40%, and effluent TP concentration satisfied the first level A criteria discharge standard after the ad-

基金项目：“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2009BAC57B01)； 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07317－007－105)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

dition of iron chloride in the advanced treatment for phosphorus removal. At the same time, the biological tank saved 672 kW • h of power consumption per day.

Key words: A^2/O process; step-feed; upgrading and reconstruction; suspended carrier; the first level A criteria; energy saving and consumption reducing

随着国家对污水排放标准的提高,脱氮除磷新工艺的研究、开发和工程应用越来越受到污水处理界的重视。20 世纪 90 年代以来,国外学者将分段进水的概念应用于脱氮除磷系统,并对此进行了广泛的研究。目前在美国、日本、新西兰等国的污水处理厂中已经开始应用连续流分段进水 A/O 工艺处理市政生活污水,但在我国尚没有实际工程应用[1,2]。

连续流分段进水 A^2/O 工艺作为一种高效的生物脱氮除磷工艺,具有所需池容较小、脱氮效率高、抗冲击负荷能力强等优点,在我国已进行了广泛的试验研究。祝贵兵等[3]探讨了分段进水生物脱氮工艺设计参数的优化,与前置反硝化工艺相比,分段进水生物脱氮工艺可在总反应池容积减少的情况下保持较高的总氮去除率,流量分配比在温度、进水水质和水量变化较大的情况下影响系统的优化运行; 王伟等[4~6]阐述了分段进水脱氮工艺的控制要点,并对进水流量分配比、段数、C/N 值、污泥回流比、溶解氧等因素做了详细的研究; 葛士建等[7]采用改良 UCT 分段进水工艺处理实际生活污水,建立了碳、氮、磷的物料衡算公式,并以稳态条件下的试验数据为基础分析了各指标的物料分布情况。这些系统性研究为分段进水 A^2/O 工艺在工程中的应用奠定了理论基础。

青岛城阳污水处理厂采用传统 A^2/O 工艺,系统对 TN 和 TP 的去除率分别为 27.2% 和 57.1%,出水水质达不到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准。原 A^2/O 工艺为单一污泥混合生长系统,此系统存在一些固有的缺陷,多种微生物混合生长势必会带来同步脱氮除磷的矛盾: 自养菌和异养菌混合生长的泥龄矛盾、聚磷菌和反硝化菌竞争电子供体的矛盾等,这导致了传统 A^2/O 系统的脱氮除磷效率不会很高。为提高系统的脱氮除磷性能,同时实现节能降耗,采用改良 A^2/O 三段进水工艺对该厂进行升级改造,通过分段进水的方式提高系统对原水中碳源的利用率,强化系统的脱氮除磷能力,并通过投加悬浮填料来提高硝化性能[8,9]。

1　材料及方法

1.1　生物池进水水质与分析方法

城阳污水处理厂进水中工业废水所占比例为 60%。原水 COD 为 174 ~ 555 mg/L, BOD 为 44 ~ 240 mg/L, TKN 为 29.34 ~ 52.18 mg/L, NO_2^- – N 为 0.046 ~ 0.455 mg/L, NO_3^- – N 为 0 ~ 6.44 mg/L, TP 为 3.02 ~ 25.89 mg/L, pH 值为 6.75 ~ 8.07。COD、BOD、NH_4^+ – N、NO_2^- – N、NO_3^- – N、TN、MLSS 等采用国家标准方法测定, TKN 采用 K9840 凯氏定氮仪和 HD4020 凯氏定氮滴定系统测定, pH 值采用 WTW340i 测定仪检测。

选用江苏裕隆环保有限公司生产的 YL – Ⅱ型 (Ø25 mm × 12 mm) 悬浮填料。该填料采用科学配方,在高分子材料中融合多种有利于微生物快速附着生长的微量元素,经过特殊工艺改性、构造而成,具有比表面积大、亲水性好、生物活性高、挂膜快、处理效果好、使用寿命长等优点。载体的比表面积 > 500 m^2/m^3,孔隙率 > 95%,密度约为 0.95 g/cm^3,适用温度为 – 35 ~ 65 ℃。

1.2　运行方式

城阳污水处理厂原来采用传统 A^2/O 工艺(两组池子),处理水量为 5×10^4 m^3/d,污泥回流比为 100%,硝化液回流比为 400%。改造后采用三段进水 A^2/O 工艺运行,省却硝化液回流,在第二段和第三段好氧区中投加悬浮填料,工艺如图 1 所示。

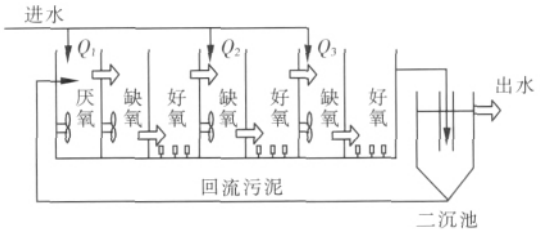

图 1　改良 A^2/O 三段进水工艺示意

Fig. 1　Schematic diagram of modified three-feed A^2/O reactor

调试分为两个阶段: 第一阶段为 2011 年 1 月 22 日—3 月 14 日(1 ~ 47 d),污泥回流比为 78%,

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

流量分配比不确定,在该阶段好氧区的悬浮填料在启动一周后大量堆积在拦截筛网前端,笔者称之为筛网堵塞;第二阶段为 2011 年 3 月 15 日—6 月 5 日(48 ~ 109 d),于拦截筛网底部布置穿孔曝气管,以解决筛网堵塞问题,同时维持污泥回流比为 78%、流量分配比为 40∶30∶30。

2　运行结果分析

2.1　改造前的出水水质

进水 COD/TN 值在 4.9 ~ 16.2 之间,平均为 8.29,原水碳源相对充足,理论上可以满足生物脱氮除磷的需求。在升级改造前传统 A^2/O 工艺的除污效果见表 1(TN 数据为 2010 年 9 月—2011 年 1 月的统计值,其余为 2010 年的运行数据)。

表 1　改造前传统 A^2/O 工艺的除污效果

Tab. 1　Pollutants removal before reconstruction

项　目	COD	NH_4^+ – N	TN	TP
去除率范围/%	60.56 ~ 95.3	34.39 ~ 98.49	6.3 ~ 47.18	17.65 ~ 74.4
平均去除率/%	81.5	84.7	27.2	57.1
平均出水值/(mg·L^{-1})	34	4.23	20.85	1.89

原 A^2/O 工艺出水中的氨氮、总氮和总磷浓度偏高,缺氧结束时的 NO_3^- – N 值仍达 8.1 ~ 10.22 mg/L,说明系统中存在有机碳源利用不合理的问题。部分碳源在厌氧区和缺氧区被用来释磷以及反硝化脱氮,但大部分的有机碳源在好氧区被氧化分解,而没有被优先用于脱氮除磷,造成了碳源的极大浪费。而且回流污泥中含有一定量的硝酸盐,回流到厌氧区后利用进水中的 VFA 进行反硝化,从而使厌氧释磷所需碳源不足,影响了系统的充分释磷,进而导致好氧段吸磷不完全,使系统的除磷效率降低。传统 A^2/O 工艺中出水 NO_3^- – N 浓度的高低取决于硝化液回流比的大小,对于前置反硝化工艺而言,要达到 75% 的 TN 去除率,污泥回流比和硝化液回流比分别应为 100%、200% [10],如要达到更高的 TN 去除率,需加大回流比,但过高的回流比会导致生物池中流态趋向于完全混合式,不利于对 TN 的去除。因此,本次改造的目的是提高系统的硝化能力并且强化系统对碳源的利用,同时达到节能降耗的目的。

2.2　改造后的运行情况

2.2.1　悬浮填料的流化状态

在生物池的好氧区投加悬浮填料,为防止填料随出水流失,在曝气池的末端设置一道拦截筛网。但在实际工程中,由于推流式廊道较长,各点的曝气强度不均匀,造成靠近筛网的下游区域填料堆积现象严重,阻挡了泥水混合液的通过。孙广路等[11]把填料堆积称之为“岛屿”现象,并认为推流式廊道低填充率区段内的填料沿池长呈指数型分布,而在下游高填充率区段内填料有自发形成“岛屿”并长大、稳定的趋势。可见,廊道越长则填料的堆积作用越明显。季民等[12]认为反应器中的流态分布并不均匀,在流速较小的区域填料容易出现停滞和堆积,建议采取一定的导流措施来强制循环,如改进曝气装置的布置方式、将反应器池壁四角抹成斜面或内置导流板等,以使反应器内流态分布趋于均衡。张成林等[13]在其研究中采用导流板强制循环,整个反应器内呈现一个大的循环趋势,但依然存在运动死角现象。

填料的流化状态与曝气强度、曝气均匀度、填料填充比以及廊道长度等因素有关。本改造工程中在曝气廊道的末端布置一道拦截筛网,强制填料在封闭区域内循环。这样虽然可以阻止填料进入下一处理单元,但因填料的不规则运动以及水流的推动作用,大量的填料会堆积在筛网的前端,导致过水不畅通。在其他因素确定的情况下调整曝气均匀度,并在筛网前端靠近底部的位置安装一排穿孔曝气管,通过强大的气流作用推开堆积的填料,达到均匀布置填料的目的,以保障悬浮填料能够始终在曝气池中循环。

2.2.2　对 COD 的去除效果

实际运行数据表明,尽管进水 COD 在 181 ~ 553 mg/L 范围内波动,出水 COD 浓度能稳定维持在 19 ~ 50 mg/L,平均为 38 mg/L,可以达到一级 A 排放标准;平均去除率为 86.25%,高于改造前的平均去除率。经分析可知,原水中的有机物进入到缺氧区后,反硝化菌不仅将它用作电子供体,而且还将其用作碳源以合成细胞物质,降低了后续好氧区的有机负荷,同时原水分散进入到生物池,由于稀释作用,各段的悬浮固体浓度(MLSS)呈现梯度分布,系统中的污泥总量大于传统 A^2/O 工艺的,原水中的有机物被缺氧区高浓度的活性污泥吸附、利用、降解,系统有较强的抗冲击负荷能力。

2.2.3　对氨氮和 TN 的去除效果

图 2 反映了系统对 NH_4^+ – N 和 TN 的去除效

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

果。在前 47 d,出水 NH_4^+ – N 在 0.85 ~ 28.73 mg/L 之间波动,平均去除率仅有 60%; 出水 TN 平均值为 26.74 mg/L,平均去除率只能达到 21.85%。当筛网堵塞问题解决后,通过对运行参数的调整和优化,改良 A^2/O 三段进水工艺对 NH_4^+ – N 和 TN 的去除性能均有较大幅度的提高,去除率最终分别维持在 95% 和 66% 以上,出水 NH_4^+ – N 和 TN 平均值分别降至 1.57 mg/L 和 13.56 mg/L,满足一级 A 排放标准的要求。

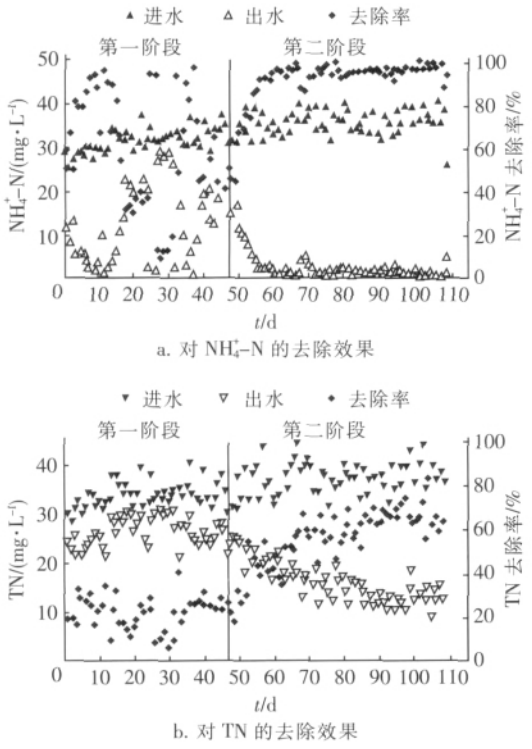

图 2　经改造后对 NH_4^+ – N 和 TN 的去除效果

Fig. 2　NH_4^+ – N and TN removal performance after reconstruction

在第一阶段筛网堵塞造成生物池最后一段的污泥浓度偏低,异养菌、硝化菌以及反硝化菌数量不足,系统对污染物的去除性能受到很大影响。在筛网堵塞问题得以解决后,对 NH_4^+ – N 和 TN 的去除率相比改造前则分别提高了 10.3% 和 38.8%。在传统 A^2/O 工艺中,由于曝气廊道较长,异养菌和硝化菌对溶解氧的需求不同,曝气末端的溶解氧浓度往往偏高,造成了溶解氧的浪费,而在分段进水工艺中污水沿池长分段进入生物池,使有机负荷及需氧量得到均衡,能够比较充分地发挥活性污泥微生物的降解功能,又在一定程度上缩小了需氧量与供氧量之间的差距,有助于降低能耗。

图 3 反映了筛网堵塞对生物池去除污染物的影响(数据为各段缺氧和好氧始末端的测定值)。可以看出,筛网堵塞时,污泥浓度直接从 A 点的5 000 mg/L 降低到 B 点的 1 000 mg/L 左右,同时系统对污染物的降解能力迅速变差; 当筛网堵塞问题解决后,各段的污泥浓度呈现出较小的梯度变化,出水 NH_4^+ – N、NO_3^- – N 和 TP 分别为 0、13.5 和 1.30 mg/L,系统对污染物的去除率较高。同时可以看出第一段中反硝化充分,而第三段的反硝化容量略有不足,这是由于缺氧 1 的进水较多,其中含有大量易于生物降解的有机物,利于反硝化的迅速完成,而进入到缺氧 3 中的原水偏少,反硝化所需的电子供体主要是胞内储存物 PHA,而外碳源比 PHA 作为碳源的反硝化速率高 6 倍[14],因此第三段的反硝化并不充分,此外原水碳氮比值低也限制了反硝化反应。

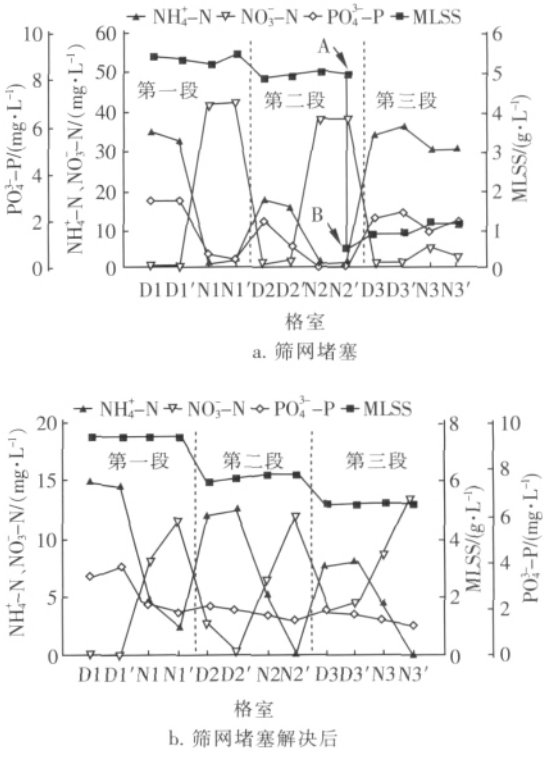

图 3　筛网堵塞对污染物降解效果的影响

Fig. 3　Pollutant removal performance with and without screen blockage

2.2.4　对 TP 的去除效果

进水 TP 浓度波动较大,为 3.02 ~ 25.89 mg/L,平均值为 7.78 mg/L。在第一阶段对 TP 的平均去除率为 66.53%,出水平均值为 2.00 mg/L; 在第二

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

阶段对 TP 的平均去除率为 81.40%，出水平均值为 1.28 mg/L，在运行的最后 26 d 中，出水 TP 可以稳定达到一级 A 排放标准。改良 A^2/O 三段进水工艺对 TP 保持了很高的去除率，分析原因可能有两个：①污泥回流比仅为 78%，随着回流进入到厌氧区的硝态氮与进水混合后迅速发生反硝化反应而得以去除，为系统创造了一个严格的厌氧环境，聚磷菌(PAOs)将剩余有机底物以 PHA 的形式贮存在体内，并大量释磷，强化了 PAOs 的竞争优势，为好氧吸磷创造了有利条件；②在第二段缺氧区中存在反硝化除磷(DNP)作用，进一步强化了系统的除磷能力。

为验证第二段缺氧区中的反硝化除磷现象，设计如下试验：取 2 L 烧杯，接种第二段缺氧区的活性污泥，控制初始污泥浓度为 3 004 mg/L；迅速投加乙酸钠和磷酸二氢钾及微量元素，控制初始 COD 为(200 ± 10) mg/L，磷酸盐为 6 mg/L，先进行 180 min 的厌氧搅拌(释磷)，再平均分成两份，一份通入氧气进行好氧吸磷，一份投加硝酸钾(控制初始浓度为 23 mg/L)进行缺氧吸磷反应。两种反应的持续时间均为 300 min，其中投加硝酸钾的反应器在反应进行 150 min 后再次投加硝酸钾溶液为 27 mg/L。结果见图 4。

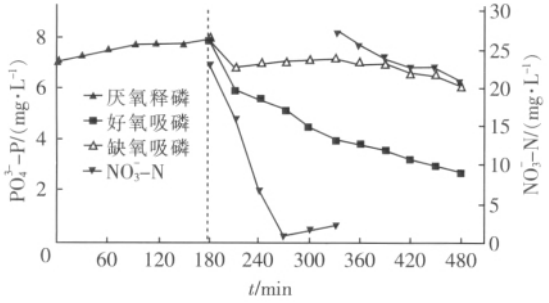

图 4　静态释磷及吸磷效果

Fig. 4　Static experiment of phosphorus release and uptake performance

由图 4 可知，缺氧搅拌 30 min 时 PO_4^{3-} - P 的浓度达到最低，之后趋于平稳。在 330 min 时再次投加硝态氮后，由于系统中溶解性 COD 在 270 min 时已被反硝化消耗完全，反硝化聚磷菌(DNPAOs)利用硝酸盐为电子受体分解细胞内的 PHA，产生的能量用以磷的吸收和合成聚磷。但与好氧吸磷相比，缺氧吸磷速率较低，吸磷量也较少，好氧吸磷是磷的主要去除途径。

2.3　改造前后耗电量对比

经改造后，分段进水 A^2/O 系统调整了一些设备的运行，包括关闭 4 台硝化液回流泵和 1 台污泥回流泵，新增 6 台潜水搅拌器，在提高出水水质的同时达到了节能降耗的目的。工程中选用的搅拌器功率为 4.5 kW，硝化液回流泵功率为 10 kW，污泥回流泵功率为 15 kW，改良后生物池每天可节省电耗为 672 kW·h。

3　结论

①　传统 A^2/O 工艺对碳源的利用率较低，出水 COD、NH_4^+ - N 浓度可以达到一级 A 排放标准，但对 TN 和 TP 的去除率分别只有 27.2% 和 57.1%，出水值达不到一级 A 标准。

②　经改良后，原水分散进入到生物池中，系统对 COD、NH_4^+ - N、TN 的去除率比改造前都有较大的提高，分别为 86.25%、95% 和 66%，出水值皆可以达到一级 A 标准。

③　生物池对 TP 的去除以好氧吸磷为主，并伴有少量的反硝化除磷现象，对 TP 的去除率可达到 81.40%，剩余的 TP 可通过投加少量的氯化铁进一步去除。

④　穿孔曝气管可以有效解决填料堆积的问题，促使填料流化均匀，而且填料对气泡的切割作用可提高氧传质效率和对氧的利用率。

⑤　停止硝化液回流后，每日可节省电耗约 672 kW·h。

参考文献：

[1]　Zhu Guibing, Peng Yongzhen, Wang Shuying, *et al*. Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process [J]. Chem Eng J, 2007, 131(1/3): 319 - 328.

[2]　Ge Shijian, Peng Yongzhen, Wang Shuying, *et al*. Enhanced nutrient removal in a modified step feed process treating municipal wastewater with different inflow distribution ratios and nutrient ratios [J]. Bioresour Technol, 2010, 101(23): 9012 - 9019.

[3]　祝贵兵，彭永臻，周利，等. 优化分段进水生物脱氮工艺设计参数 [J]. 中国给水排水，2004，20(9)：62 - 64.

(下转第 31 页)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

较弱,处理效果较 3#反应器稍差。综上可知: 4#反应器的生物膜的生物量较 3#反应器的多,但微生物活性较 3#反应器的弱,对 COD 和 NH_3 – N 的去除效果不及 3#反应器。

3　结论

①　接种适量的悬浮污泥一方面可以缩短 HBR 中悬浮污泥的驯化时间,另一方面悬浮微生物和附着微生物之间的竞争有助于形成合适的生物膜结构,生物膜的微生物活性高,加快了 HBR 整体启动过程。

②　接种适量悬浮污泥的 3#反应器对 COD、NH_3 – N 的去除效果最佳,去除率分别为 93% 和 100%,生物膜的生物量为 1.2 g/L,生物膜平均厚度和微生物活性分别稳定在 290 μm 和 58 mgO_2/(gMLSS·h) 左右。

参考文献:

[1] Artiga P, Oyanedel V, Garrldo J M. An innovative biofilm-suspended biomass hybrid membrane bioreactor for wastewater treatment [J]. Desalination, 2005, 179(1/3): 171 – 179.

[2] Christensson M, Welander T. Treatment of municipal wastewater in a hybrid process using a new suspended carrier with large surface area [A]. 5th IWA Conference on Biofilms Systems [C]. Cape Town: IWA, 2003.

[3] 周平,何嘉汉,钱易. 内循环生物流化床反应器载体挂膜特性的研究 [J]. 环境科学学报,1998,18(1): 68 – 72.

[4] 俞汉青,顾国维. 生物膜反应器挂膜方法的实验研究 [J]. 中国给水排水,1992,8(3): 13 – 17.

[5] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社,2002.

[6] 刘雨,赵庆良,郑兴灿. 生物膜法污水处理技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2000.

[7] 符波,廖潇逸,丁丽丽,等. 环境扫描电镜对废水生物样品形态结构的表征研究 [J]. 中国环境科学,2010,30(1): 93 – 98.

[8] 董双石,周丹丹,BI Xiao-tao,等. 好氧锥形流化床生物膜反应器启动与生物膜形成特征研究 [J]. 环境科学,2009,30(3): 827 – 833.

作者简介: 姜丽丽(1986 –),　女,　吉林松原人,　硕士研究生,　研究方向为水处理技术。

E – mail: jiangpinbo@126.com

通讯作者: 周律

收稿日期: 2011 – 11 – 09

(上接第 26 页)

[4] 王伟,王淑莹,王海东,等. 连续流分段进水生物脱氮工艺控制要点及优化 [J]. 环境污染治理技术与设备,2006,7(10): 83 – 87.

[5] 王伟,王淑莹,孙亚男. 分段进水 A/O 工艺在低 DO 下处理生活污水研究 [J]. 中国给水排水,2007,23(21): 1 – 5.

[6] 王伟,彭永臻,孙亚男. 污泥回流比对分段进水 A/O 生物脱氮工艺的影响 [J]. 中国环境科学,2008,28(2): 116 – 120.

[7] 葛士建,彭永臻,张亮,等. 改良 UCT 分段进水脱氮除磷工艺性能及物料平衡 [J]. 化工学报,2010,61(4): 1009 – 1017.

[8] 魏海娟,张永祥,张粲. 移动床生物膜系统 SND 影响因素研究 [J]. 环境科学,2009,30(8): 2342 – 2346.

[9] 马华敏,张立秋,孙德智. 缺氧 – 好氧移动床生物膜反应器处理低温生活污水效能 [J]. 环境科学研究,2010,23(7): 958 – 963.

[10] Zhu Guibing, Peng Yongzhen, Li Baikun, *et al*. Biological removal of nitrogen from wastewater [J]. Rev Environ Contam Toxicol, 2008, 192: 159 – 195.

[11] 孙广路,李山,孙承林. 推流式移动床生物膜反应器填料分布研究 [J]. 环境工程,2009,27(S1): 202 – 204.

[12] 季民,董广瑞,霍金胜,等. 移动床生物膜反应器水力特性的数值模拟 [J]. 中国给水排水,2002,18(5): 14 – 17.

[13] 张成林,倪琦,徐皓,等. 导流式移动床生物膜反应器流速选择及流态分析 [J]. 水产学报,2011,35(2): 283 – 290.

[14] Third K A, Burnett N, Cord-Ruwisch R. Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate (PHB) as the electronic donor in an SBR [J]. Biotechnol Bioeng, 2003, 83(6): 706 – 720.

作者简介: 朱云鹏(1986 –),　男,　山西运城人,　硕士研究生,　从事污水生物处理技术研究。

E – mail: zhuyunpeng@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 彭永臻

收稿日期: 2011 – 11 – 20

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net