

纯氧曝气在垃圾焚烧厂渗滤液 处理系统中的实验分析

高用贵^{1,2} 江景杰^{1,2} 李成海^{1,2} 肖诚斌^{1,2} 谭勇^{1,2,*} 张林^{1,2}
高兴斋^{1,2} 庞保蕾^{1,2} 陆红^{1,2} 李敬^{1,2} 徐璜^{1,2}

(1. 光大环保技术研究院(深圳)有限公司, 深圳 518000; 2. 光大环保技术装备(常州)有限公司, 常州 213011)

摘要 为研究纯氧曝气对垃圾渗滤液生化反应池的处理效能和工艺运行的稳定性,于2014年10月21日至2015年1月5日在某垃圾焚烧厂渗滤液处理站进行工程性实验。在生化反应池的O段安装纯氧曝气器,以COD、NH₃-N为综合指标,考察渗滤液的处理量和设备的运行维护情况。结果表明,初期纯氧曝气可以改善生化系统中污泥的性状,使渗滤液的处理满足生产需要;2台曝气器运行时,A/O系统平均可处理87.5%的COD和98.3%的NH₃-N,而单台运行时,平均去除83.0%的COD,98.9%的NH₃-N,表现为对NH₃-N有很强的去除效率;纯氧曝气有很大的耐COD负荷冲击能力,可使工艺运行处于稳定状态;高效的渗滤液处理能力增加了容积负荷,从而降低曝气池的体积;无需鼓风机和鼓风机房,降低了环境噪音和土建占地。综上所述,它是一种简单、经济、实用的渗滤液处理工艺,且维护方便,适用于新建和改扩建工程项目。

关键词 纯氧曝气处理系统;垃圾焚烧厂;垃圾渗滤液;活性污泥法;工程实验

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)10-5689-06 DOI 10.12030/j.cjee.201504208

Experimental analysis of pure-oxygen aeration in waste incineration plant leachate treatment system

GAO Yonggui^{1,2} JIANG Jingjie^{1,2} LI Chenghai^{1,2} XIAO Chengbin^{1,2} TAN Yong^{1,2,*} ZHANG Lin^{1,2}
GAO Xingzhai^{1,2} PANG Baolei^{1,2} LU Hong^{1,2} LI Jing^{1,2} XU Huang^{1,2}

(1. Everbright Environmental Protection Technological Development (Shenzhen) Limited, Shenzhen 518000, China;
2. Everbright Environmental Protection Technology & Equipment (Changzhou) Limited, Changzhou 213011, China)

Abstract The treatment performance of a biochemical reaction basin and the stability of the pure-oxygen aeration treatment system leachate operation process were researched by conducting an engineering test in a waste incineration plant. The test period was October 21, 2014 to January 5, 2015. The pure-oxygen aeration treatment system was installed to investigate its treatment capacity and operating maintenance, with the aggregative indicators being COD and NH₃-N. The results indicated that the pure-oxygen aeration treatment system could improve the biological properties of the sludge, with the early stage treatment capacity meeting production requirements. In addition, the average removal rates of the A/O system were 83.0% and 98.9% for COD and NH₃-N, respectively, with the addition of an aerator. The apparent average removal rates when two aerators were employed were 87.5% and 98.3%, respectively. This was a superior rate for degrading NH₃-N. Additionally, the stable operation process could be attributed to the high concentration of COD disposed by the pure-oxygen aeration treatment system. The higher treatment efficiency increased the volumetric loading, as it decreased the volume of the aeration basin. Not having to employ a blower room and an air blower reduced the ambient noise and the area covered by civil engineering. Therefore, the pure-oxygen aeration treatment system is considered a simple, economical, and practical leachate technology, suitable for new and reconstructed engineering projects.

Key words pure-oxygen aeration treatment system; waste incineration plant; leachate; activated sludge method; engineering test

收稿日期:2015-04-22; 修订日期:2015-07-03

作者简介:高用贵(1977—),男,硕士,高级工程师,研究方向:水污染控制与治理等。E-mail: gaoyg@ebchinaintl.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: tany@ebchinaintl.com.cn

一般地,城市生活垃圾中有机物含量约为 30%~40%,无机物含量约为 20%~30%,水分含量约为 40%~60%。在垃圾的堆放和填埋过程中,由于物理压实、发酵等生物化学作用,同时在降水和地下水的渗流作用下产生了一种高浓度的有机或无机成份的液体,称之为垃圾渗滤液^[1]。由于其成分中包含难降解的腐殖酸和富里酸、外源性物质、农药、重金属和无机阴阳离子等^[2],这些因子又受地域、气候条件、垃圾类型和居民生活习惯的影响^[3],导致垃圾渗滤液构成和数量的多变性,使其成为高浓度难处理的废水而普遍被人们所认识。业界通常利用生化技术对其进行处理,例如上海老港垃圾填埋场初期采用 ARB 技术^[4]、后期采用 ARB 与电氧化法相结合^[5]以及光大国际焚烧发电厂的活性污泥法。

传统活性污泥法的生化反应池内普遍利用空气曝气为好养微生物提供氧气,以供其生长、发育、繁殖和代谢的需求,进而通过污泥的吸附和微生物的降解作用,使污水中的污染物得到去除,净化水质^[6-7]。纯氧曝气活性污泥法是由欧美发达国家在传统活性污泥的基础上发展起来的一种高效污水处理技术,它利用含量在 90% 以上的纯氧取代空气进行曝气^[8-9]。与传统活性污泥法相比,它具有占地面积小、耐冲击负荷、曝气时间短、不产生气泡和污泥量少等一系列优点^[10-11],广泛应用于生活污水和工业废水(比如石油化工,焦化废水,印染废水等)的处理^[12]。截至目前为止,鲜有文献记载纯氧曝气应用于垃圾焚烧厂渗滤液处理的先例,因此,本研究在考虑工程建设与设备运营和维护的基础上,将纯氧曝气应用于垃圾渗滤液处理工艺的生化反应阶段,在 A²O 系统的 O 段安装 I-SOTM 现场纯氧曝气装置,以 COD, NH₃-N 为综合指标,考察出水水质达标情况下其运行状态以及工程应用中设备的维护。

1 材料与方法

1.1 纯氧曝气的理论基础

根据亨利定律^[13]:在等温等压下,某种挥发性溶质在溶液中的浓度与液面上该溶质的平衡压力成正比。

$$P_{O_2} = H_c \cdot C_s \quad (1)$$

式中: C_s 为处于平衡状态下,氧气在水中的饱和浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; H_c 为亨利常数,只是温度的函数,与压力无关; P_{O_2} 为氧气的平衡分压, Pa。亨利定律给出

了混合气体中溶质气体进入溶液的定量关系。

菲克第一定律指出,在单位时间内通过垂直于扩散方向单位面积的扩散物质流量与该截面处的浓度成正比,即浓度梯度越大,扩散通量越大。由双膜理论可知,在曝气过程中,氧分子通过气、液界面由气相转移到液相的传质过程的阻力集中在液膜上;氧气转移的推动力主要是气膜中存在的氧分压梯度和液膜中存在的氧浓度梯度。因此,氧气溶解过程中的扩散速度 N_0 可以由传质速率方程^[14]表示:

$$N_0 = \frac{dc}{dt} = K_{La}(C_s - C) \quad (2)$$

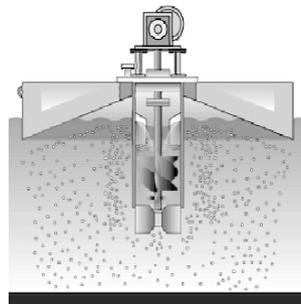
式中: N_0 为氧气的扩散速度, $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$; C_s 为氧的饱和浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C 为氧气在水中的实际浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_{La} 为传质总系数,它是温度、水质及气液混合强度的函数。

1.2 纯氧曝气装置

I-SOTM 现场纯氧曝气装置是由普莱克斯公司自行研制的纯氧曝气专用设备,并获中美两国专利。I-SOTM 现场纯氧曝气装置主机(见图 1)由电动机,变速箱,浮筒,导流筒和双螺旋推进器等 5 部分组成,并配以氧气控制阀组和电气控制柜。它运行时浮在水面,通过钢丝绳将其固定于曝气池中,能够保证将氧气高效地溶于废水中,为好氧生物处理提供所需要的氧气,同时对混合液进行搅拌。



(a) 工作现场图



(b) 结构图

图 1 I-SOTM 装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of I-SOTM device

1.3 渗滤液站概况

常州某焚烧发电厂渗滤液处理站的设计规模为 $400 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 采用“预处理 + 厌氧 + 生化 + 超滤 + 纳滤 + 反渗透”工艺处理垃圾渗滤液, 生化系统中 2 套相同处理量的 A/O 系统同时运行。

设计的进水水质: $\text{pH} = 5.0 \sim 6.0$, $\text{COD} \leq 5\,500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{BOD}_5 \leq 30\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{SS} \leq 12\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_3\text{-N} \leq 1\,800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。最终的出水水质达到《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923-2005) 要求。

1.4 纯氧曝气工程实验

实验以纯氧曝气 A^2O 工艺为研究对象(见图 2), 利用缺氧段中反硝化细菌的反硝化作用实现生物脱氮, 好氧段中好氧菌对有机污染物的氧化作用来实现对有机污染物的去除^[15]。工程实验前期安装纯氧曝气实验装置, 并将液氧导入到纯氧储罐中, 以供实验使用。

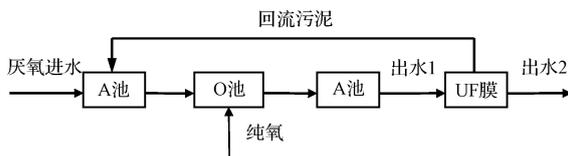


图 2 纯氧曝气工艺流程图

Fig. 2 Process flow diagram of UNOX

根据测试结果和实验现场运行情况, 可将实验分为 3 个阶段。第 1 阶段为池体的试运行阶段, 2014 年 10 月 21 日至 11 月 26 日, 共计 36 d, 在池体内部安装 2 台 I-SOTM 设备, 实验初期主要调节生化反应池的理化性状和考察纯氧曝气活性污泥对垃圾渗滤液的处理量; 第 2 阶段为正式实验阶段, 11 月 26 日至 12 月 16 日, 共计 21 d, 2 台 I-SOTM 设备位置不变, 主要考察纯氧曝气对 COD、NH₃-N 的去除效率和渗滤液的处理量; 第 3 阶段为单台 I-SOTM 设备运行阶段, 2014 年 12 月 16 日至 2015 年 1 月 5 日, 共计 20 d, 主要考察纯氧曝气对 COD、NH₃-N 的去除效率和渗滤液的处理量以及纯氧曝气设备的服务范围。其中, COD、NH₃-N 的检测分别采用重铬酸钾法和纳氏试剂光度法。

2 结果与分析

2.1 第 1 阶段

工程性实验初期, 由于大量死泥回流至 A/O 池, 使池内污泥严重恶化, 导致系统内产生大量的碎

片状污泥, 泡沫较多, 一直处于污泥性状调节阶段。由图 3 可知, 处理量随时间的变化呈现先增加后减小的趋势, 随着纯氧不断地供入 O 池, 污泥的性状明显得到改善, 处理量迅速提高, 最大时甚至接近系统的设计值, 从而使处理的渗滤液量能够满足生产的需要。观测结果显示, 在纯氧曝气状态下, 系统对膨胀严重的丝状污泥有一定的抑制能力, 泡沫产生量小。非正常状态运行时, 亦能使 A/O 系统对渗滤液的平均处理量达到设计值的 70% 甚至更高。

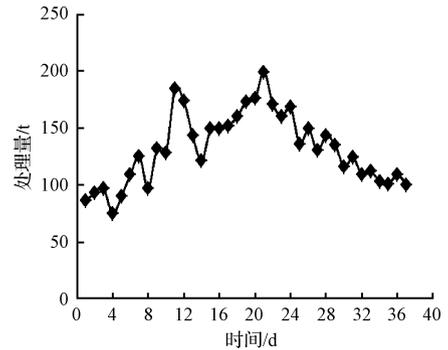


图 3 第 1 阶段运行日期与处理量关系图

Fig. 3 Schema of treatment capacity and time 1st stage

2.2 第 2 阶段

在本阶段的实验中, 渗滤液中 COD 的平均进口浓度为 $13\,411 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 初期表现为 COD 浓度上升, 随着系统的运行而后呈现逐渐减小的趋势(图 4(a))。经由 A/O 系统纯氧曝气处理后, 平均可去除 87.5% 的 COD, 且去除率与 COD 浓度有明显的正相关关系, 而与处理量之间相关关系不显著。处理后的出水 COD 能够维持在相对稳定的状态, 保证超滤进一步对 COD 的降解, 使其亦有 69.0% 以上的去除效果(图 4(b)), 且线性相关显著。NH₃-N 的平均进口浓度为 $1\,630 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 渗滤液经 A/O 系统处理后, 平均去除 98.3% 的 NH₃-N, 且去除率与浓度之间正相关关系较明显, 却与处理量关系不显著(图 5)。

经过处理后系统 NH₃-N 浓度显著降低, 低于《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008)。图 4(b) 和图 5(b) 显示, 渗滤液的处理量首先出现线性增加后急剧下降, 最后维持在稳定水平, 共 5 批次的渗滤液的吨水耗氧量分别为 21.17、15.17、22.1、31.28 和 28.41 kg。

渗滤液进水指标不稳定的情况下, 纯氧曝气有一定的耐负荷冲击能力, 保证 A/O 系统处理量的前提下, 亦可使整个系统处于相对稳定的状态。

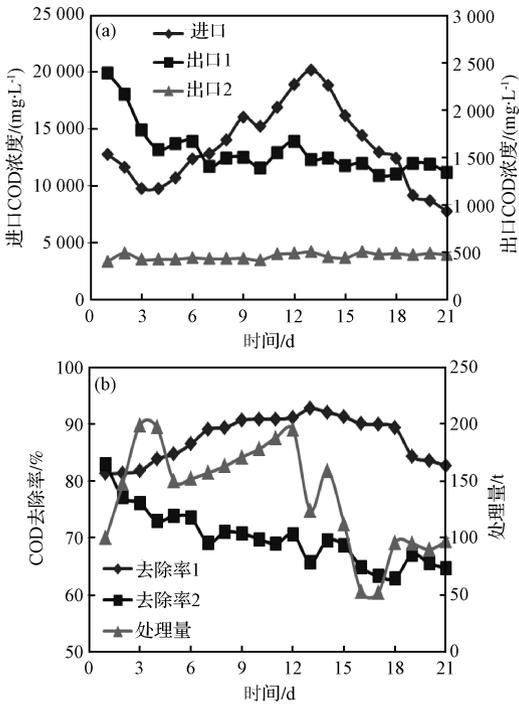


图 4 第 2 阶段 COD 浓度 (a) 和 COD 去除率及处理量随时间的变化 (b)

Fig. 4 Variation of COD concentration (a) and COD removal rate, treatment capacity and time (b) in 2nd stage

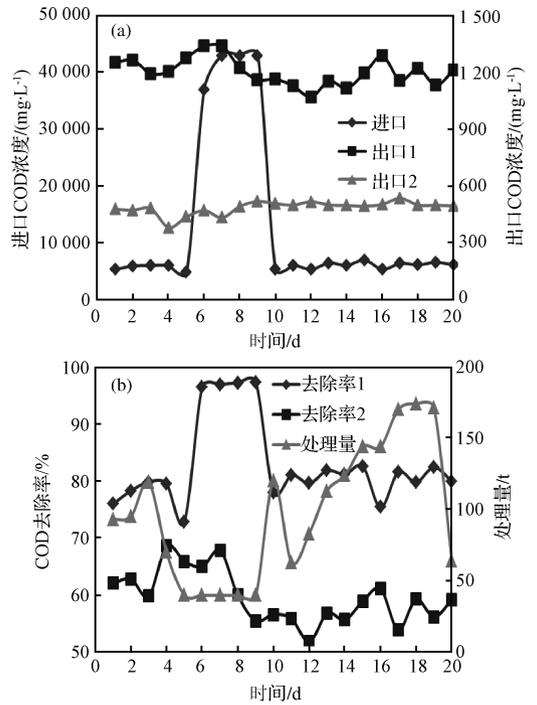


图 6 第 3 阶段 COD 浓度随时间的变化 (a) 和 COD 去除率及处理量随时间的变化 (b)

Fig. 6 Variation of COD concentration and time (a) and COD removal rate, treatment capacity and time (b) in 3rd stage

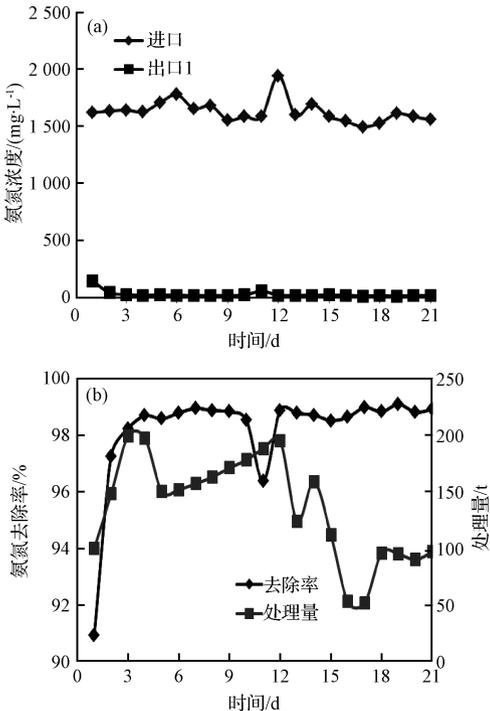


图 5 第 2 阶段氨氮浓度随时间的变化 (a) 和氨氮去除率及处理量随时间的变化 (b)

Fig. 5 Variation of NH₃-N concentration and time (a) and NH₃-N removal rate, treatment capacity and time (b) in 2nd stage

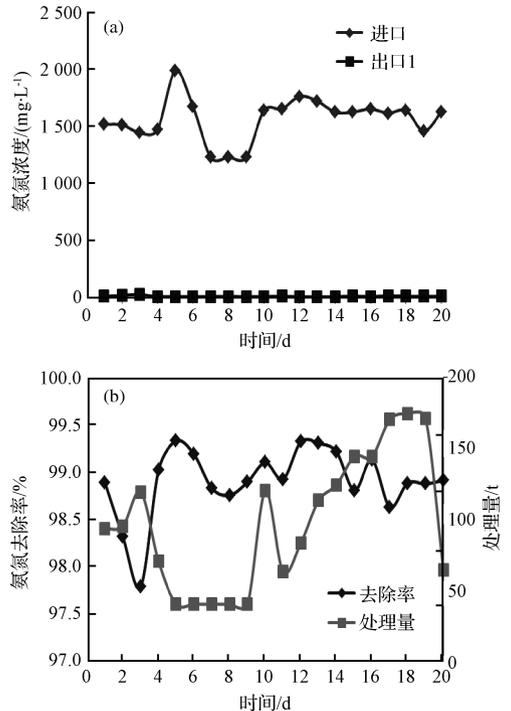


图 7 第 3 阶段氨氮浓度随时间的变化 (a) 和氨氮去除率及处理量随时间的变化 (b)

Fig. 7 Variation of NH₃-N concentration and time (a) and NH₃-N removal rate, treatment capacity and time (b) in 3rd stage

2.3 第 3 阶段

本阶段运行 5 d 后,连续向 A/O 系统中投入渗滤液原液,进口处 COD 浓度急剧增大,最高达到 $43\ 000\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时 COD 的去除率却能在 96.5% 以上,是因为处理量的急剧减少保证了 COD 去除率与浓度之间呈现的正相关关系。然而这 1 阶段 COD 的平均去除率为 83.0%,相比第 2 阶段有一定的减小。而随着进水的稳定,COD 的浓度亦趋稳定(图 6 和图 7)。二级 A 池稳定的出水,保证了超滤系统对 COD 平均 60.0% 的处理效率。当处理量不大时,尽管进口 COD 浓度很高,出水亦能维持在相对均一水平,表明纯氧曝气能够在短时间内吸收超浓度的 COD,使其浓度降低。此阶段中,进口处 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均浓度为 $1\ 567\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与之相对的平均出水浓度为 $17\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率达到 98.9%。通入渗滤液原液,去除率与处理量之间亦未出现显著相关关系。随着后端缓慢增加渗滤液处理量, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度都能在某值附近波动,印证了该系统能够很好地处理掉更多的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。此阶段中,单台曝气器共 3 批次的渗滤液的吨水耗氧量为别 29.2、13.07 和 9.21 kg。根据此台曝气器工作时,现场服务直径可以到达 14 m,新建项目可以依此设计曝气池类型,改扩建项目也可依此合理地设置曝气器组合,达到最优。

对比 2 个阶段中的纯氧曝气器,A/O 系统中 COD 去除率下降,从平均 87.5% 降至 83.0%,显然对于 COD 浓度极高的垃圾渗滤液是有变化的。纯氧曝气器能扩大曝气面积,更快地增大氧气分压,提高纯氧溶解于水中的扩散速度,使溶解氧迅速处于饱和状态,促进好氧微生物生长与合成代谢,降低 COD 浓度。2 个阶段对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率都能达到 98% 甚至更高,充足的溶解氧促进硝化细菌的硝化作用,使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 能够更完全地转化为硝态氮,再通过 A 池反硝化细菌的反硝化作用将硝态和亚硝态氮去除。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的有效去除,一方面可以降低周围空气中的异味,改善空气质量;另一方面还可以改善生化池微生物环境,减轻深度处理的压力。对比吨水耗氧量可发现,1 台曝气器可以满足本次实验生化池供氧量,且能耗明显低于 2 台。

较低处理量时,纯氧曝气 A/O 系统可以处理渗滤液原液,有很大的耐高浓度有机物负荷冲击能力。通过观察和对污泥成分分析,纯氧曝气可以提高活性污泥的比重,增强污泥的沉降性能,继而提高污泥负荷,使得单位池容处理能力提高,可进一步降低生化曝气池的体积^[16]。再者无需鼓风机和鼓风机房,降低了环境噪音和土建占地,进一步降低设备成本。纯氧曝气装置主体运行时浮在水面上,无污泥气泡产生,不需为此专门设置消泡泵和消泡支管,是一种更为简单、经济、实用的渗滤液处理工艺,且维护方便,适用于新建和改扩建工程项目。

3 结 论

1) 纯氧曝气可以改善生化系统中污泥的性状,使渗滤液的处理满足生产需要。

2) 2 台曝气器运行时,A/O 系统平均可处理 87.5% 的 COD 和 98.3% 的 $\text{NH}_3\text{-N}$,1 台设备运行时平均可处理 83.0% 的 COD 和 98.9% 的 $\text{NH}_3\text{-N}$,表现为对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 特别强的去除效率。

3) 纯氧曝气有很大的耐 COD 负荷冲击力,使工艺运行处于稳定状态。

4) 纯氧曝气高效的渗滤液处理能力可增加容积负荷,降低曝气池的体积,从而降低设备成本。

参 考 文 献

- [1] TUGTAS A. E., CAVDAR P., CALLI B. Bio-electrochemical post-treatment of anaerobically treated landfill leachate. *Bioresource Technology*, **2013**, 128: 266-272
- [2] KANG K. H., SHIN H. S., PARK H. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. *Water Research*, **2002**, 36(16): 4023-4032
- [3] CHRISTENSEN T. H., KJELDSEN P., BJERG P. L., et al. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, **2001**, 16(7/8): 659-718
- [4] ZHAO Youcai, LI Hua, WU Jun, et al. Treatment of leachate by aged-refuse-based biofilter. *Journal of Environmental Engineering*, **2002**, 128(7): 662-668
- [5] LEI Yangming, SHEN Zhemin, HUANG Renhua, et al. Treatment of landfill leachate by combined aged-refuse bio-reactor and electro-oxidation. *Water Research*, **2007**, 41

- (11): 2417-2426
- [6] 周增炎, 高廷耀. 传统活性污泥法污水厂增加脱氮功能的研究. 同济大学学报, **2003**, 31(10): 1229-1231
ZHOU Zengyan, GAO Tingyao. Study on enhancing nitrogen removal function for traditional activated sludge sewage treatment plants. Journal of Tongji University, **2003**, 31(10): 1229-1231 (in Chinese)
- [7] STEFANAKIS A. I., AKRATOS C. S., MELIDIS P., et al. Surplus activated sludge dewatering in pilot-scale sludge drying reed beds. Journal of Hazardous Materials, **2009**, 172(2/3): 1122-1130
- [8] NEETHLING J. B., SPANI C., DANZER J., et al. Achieving nitrification in pure oxygen activated sludge by seeding. Water Science and Technology, **1998**, 37(4/5): 573-577
- [9] COHEN D. B. A comparison of pure oxygen and diffused air digestion of waste activated sludge. Eighth International Conference on Water Pollution Research, **1978**: 691-701
- [10] ZUPANČIČ G. D., ROŠ M. Aerobic and two-stage anaerobic-aerobic sludge digestion with pure oxygen and air aeration. Bioresource Technology, **2008**, 99(1): 100-109
- [11] RODRÍGUEZ F. A., REBOLEIRO-RIVAS P., GONZÁLEZ-LÓPEZ J., et al. Comparative study of the use of pure oxygen and air in the nitrification of a MBR system used for wastewater treatment. Bioresource Technology, **2012**, 121: 205-211
- [12] LEE S., KIM M. H. Fouling characteristics in pure oxygen MBR process according to MLSS concentrations and COD loadings. Journal of Membrane Science, **2013**, 428: 323-330
- [13] 陈帅, 谭学军, 蒋玲燕. 浅谈纯氧曝气活性污泥法处理技术. 城市道桥与防洪, **2012**(1): 65-67
CHEN Shuai, TAN Xuejun, JIANG Lingyan. Elementary discussion on treatment technology by pure oxygen aeration activated sludge process. Urban Roads Bridges & Flood Control, **2012**(1): 65-67 (in Chinese)
- [14] 余薇薇, 张智, 王涛. 纯氧曝气 A/O 工艺处理医院污水的工艺特性研究. 土木建筑与环境工程, **2011**, 33(S): 9-12
YU Weiwei, ZHANG Zhi, WANG Tao. The study of hospital wastewater treatment by pure oxygen aeration and A/O process. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, **2011**, 33(S): 9-12 (in Chinese)
- [15] CERVANTES F. J., DE LA ROSA D. A., GÓMEZ J. Nitrogen removal from wastewaters at low C/N ratios with ammonium and acetate as electron donors. Bioresource Technology, **2001**, 79(2): 165-170
- [16] 崔连起, 张健, 陈淑琴. 一种简单、经济的纯氧曝气污水处理工艺. 中国给水排水, **2003**, 19(2): 77-79
CUI Lianqi, ZHANG Jian, CHEN Shuqin. A simple and economical pure oxygen aeration process for wastewater treatment. China Water & Wastewater, **2003**, 19(2): 77-79 (in Chinese)