

A/A/O 工艺全流程节能途径与对策

路晓波¹, 王佳伟², 甘一萍², 汪慧贞³, 范岳峰⁴

(1. 山西长治市供水总公司, 山西长治 046000; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100124;
3. 北京建筑工程学院, 北京 100044; 4. 上海昊沧系统控制技术有限公司, 上海 201103)

摘要 A/A/O 工艺因其较好的除磷脱氮效果而广泛应用于城市污水处理之中。但是目前工艺设计主要是基于负荷稳定条件下的经验参数确定, 往往趋于保守, 因此造成了能耗的浪费。文章从 A/A/O 工艺的特点出发, 研究了全流程的水力损失, 从而提出了进水提升泵设计的优化方案。其次, 针对耗能最大的鼓风机单元, 提出了溶解氧和出水氨氮的精确控制节能方案。最后从二沉池优化运行的角度从发, 利用状态点分析法, 提出了外回流节能的措施。

关键词 A/A/O 工艺 进水泵 溶解氧 精确控制 状态点 外回流

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2009)06-0039-06

Strategy and Approach for Energy Saving in Total Procedure of A/A/O Wastewater Treatment Processes

LU Xiao-bo¹, WANG Jia-wei¹, GAN Yi-ping¹, WANG Hui-zhen³, FAN Yue-feng⁴

(1. Changzhi Waterworks Company, Changzhi 046000, China; 2. Beijing Drainage Group, Beijing 100124, China;
3. Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;
4. Shanghai HC System, Shanghai 201103, China)

Abstract A/A/O process is applied widely in municipal wastewater treatment plants, which attribute to its good performance for nutrient removal. However, the design parameter of A/A/O process is mainly from experiences based on stable flow rate. So the design parameter is greater than requirement in fact, which contributes to energy waste. In this study, based on the characteristic of A/A/O process the hydraulic loss of whole flow line was investigated, and the design of lifting pump station was optimized firstly. Secondly, the accuracy control scheme for dissolved oxygen and effluent ammonia nitrogen was proposed to save energy of centrifugal blowers, which is the greatest proportion of energy consumption. At last, the energy consumption for returning activated sludge flow was decreased with the state point analysis, which improved the operation of secondary sedimentation tank at the same time.

Key words A/A/O process lifting pump dissolved oxygen accuracy control state point return activated sludge

城市污水中的氮磷是造成水体富营养化和生态环境恶化的重要污染污物。A/A/O 工艺因其较好的除磷脱氮效果而广泛应用于城市污水处理之中。但由于设计运行不合理, 相当一部分 A/A/O 工艺存在着高能耗问题。因此, 研发新型节能降耗脱氮除磷工艺及低能耗的改良 A/A/O 工艺, 研究基于进水负荷动态变化的工艺过程控制策略与模式, 建立污水处理 A/A/O 工艺节能降耗运行调控对策, 对于解决我

国现有大部分城市污水处理厂运行中所面临的成本高、能耗高等问题具有现实意义, 对于新建污水处理厂的优化设计也将具有重要指导意义。

本文以北京某 A/A/O 工艺污水厂 (以下记为 A 厂) 为例, 在分析全流程节能途径的基础上, 采取相应的对策与措施, 包括: 分析该厂全流程水力阻力损失, 优化高程设计, 以降低进水提升泵功率; 根据设定溶解氧值自动控制曝气量, 一方面节约能耗, 另一方面保持缺氧区或厌氧区环境, 从而提高工艺的脱氮除磷效率; 利用状态点分析法优化二沉池运行, 通过降低外回流实现节能。

1 能耗现状

城市污水处理的能耗调查研究是节能途径和手

[收稿日期] 2009-09-13

[基金项目] 国家科技支撑计划: A²O 工艺城市污水处理厂节能降耗关键技术, 2006BAC19B01

[作者简介] 路晓波 (1963-), 毕业于太原理工大学, 现担任山西长治市供水总公司党委书记 (原担任总工程师, 负责 10 万吨/天的长治市污水处理厂的筹建工作, 该厂采用 A²O 工艺, 现已经正式通水并正在申请国债基金进行升级改造), 是现任长治市政协委员。

© [通讯作者] 王佳伟, E-mail: wangjiawei100@tsinghua.org.cn

© [Copyright] China Water & Electric Press, Beijing, China. All rights reserved. http://www.cwep.com.cn

段的基础。通过对污水处理厂主要设备消耗电量进行调查,可以明确处理工艺和各处理单元的能量需求,确定与污水处理厂能耗关系密切的控制节点,从而分析各控制环节的节能潜力。

A 厂预处理、二级处理、污泥处理等各主要处理单元的能耗核算结果如图 1 所示。由图 1 可见,二级生物处理单元是整个污水处理厂的最大耗能单元,占到整个污水处理厂能耗的 59%(不包括办公区用电)。污泥处理单元耗能约占全厂的 23%左右。从 A/A/O 工艺全流程节能降耗关键技术出发,水区是节能的重点研究对象,包括预处理和二级处理单元的节能降耗。预处理和二级处理单元主要包括以下设备:格栅、进水泵、鼓风机、回流泵、剩余污泥泵、搅拌器、刮泥机以及其它耗电量相对较小的设备。水区设备的耗电情况如图 2 所示,可见鼓风机在整个水区的耗电可达 62%,进水泵、回流泵等各种泵的耗电占 32%。因此,鼓风机和各类提升泵是整个污水处理厂节能降耗的关键控制节点。

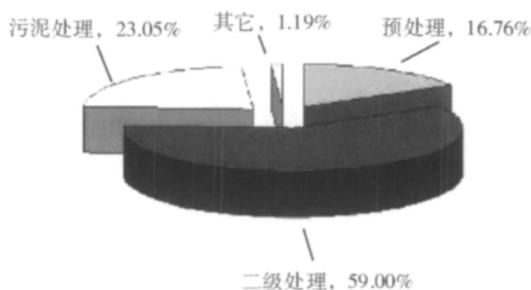


图 1 污水处理厂能耗分布

Fig.1 Distribution of energy consumption in a typical WWTP

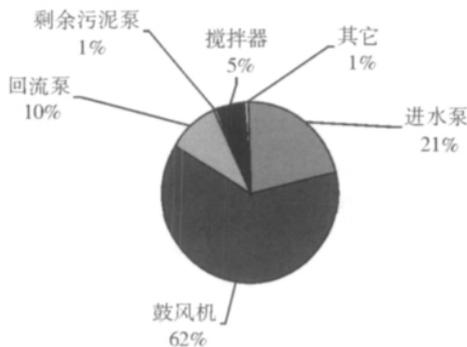


图 2 水区各设备耗电情况

Fig.2 Distribution of energy consumption for wastewater treatment subsystem

2 进水泵节能

进水泵是污水提升的主要设备,现在污水处理厂采用的进水泵种类比较多,但其电耗均可用式 1 进行计算:

$$W = \frac{\rho g Q H}{1000 \eta_1 \cdot \eta_2} \cdot t \quad (1)$$

式中:W—电机实际电耗,kW·h;ρ—污水的密度,取 1000 kg/m³;g—重力加速度,取 9.81 m/s²;Q—污水泵的实际流量,m³/s;H—污水泵的实际工作扬程,m;η₁—水泵的效率;η₂—电机的效率;t—水泵运行时间,h。

由式 1 可见,污水进水泵在稳定运行时,其电耗取决于进水泵的实际工作扬程 H。而污水提升后构筑物的水面标高正是通过高程布置确定的,与污水处理全流程的水头损失有直接的关系。目前,我国污水处理厂高程设计大多依据给水排水手册和水力计算手册,各处理构筑物内部水头损失如表 1 所示。

表 1 各处理构筑物中水头损失设计数值^[1]

Tab.1 Design values of hydraulic loss for different facilities

构筑物名称	水头损失/cm	构筑物名称	水头损失/cm
格栅	10~25	生物滤池	旋转布水 270~280
沉砂池	10~25		喷洒布水 450~475
沉淀池	平流 20~40	混合池	10~30
	竖流 40~50	接触池	10~30
	辐流 50~60	曝气池	潜流入池 25~50
双层沉淀池	10~20		跌水入池 50~150

通过对 A 厂 2008 年前六个月的污水提升能耗统计(见表 2),其耗电量从 1~6 月份呈逐步上升趋势,污水抽升量变化趋势与之一致,但是污水提升单耗保持在一个相对稳定的水平,其平均值为 0.0573 kW·h/m³。目前,污水提升节能方面的主要研究与应用都主要集中在水泵的运行管理上,处在一种被动应对的状态下。由于污水提升能耗的主要决定因素是污水提升高度,污水提升高度又取决于污水处理全流程的水头损失,所以从污水处理工艺全流程的水力状况出发研究污水提升节能措施才是最根本的途径。

表 2 2008 年上半年污水提升每月耗电量和抽升水量统计

Tab.2 Monthly energy consumption and lifted wastewater volumes from January to June in 2008

时间	1月	2月	3月	4月	5月	6月	月平均
电耗/(10 ³ kW·h ⁻¹)	750.92	700.01	869.89	860.27	895.86	895.25	828.7
水量/10 ³ m ³	13 197.19	11 974.03	15 121.48	14 967.30	15 631.74	15 504.14	14 587.9
单耗/(kW·h·m ⁻³)	0.0569	0.0585	0.0575	0.0575	0.0573	0.0577	0.0573

污水处理厂全流程水力损失主要集中在构筑物连接管线水头损失和构筑物末端堰口的跌水高度上。而污水处理厂普遍采用构筑物堰口跌水的出水方式,而且设计的跌水高度较大。连接管线的水头损失在污水全流程中也占有较大的比重,包括沿程损失和局部损失两部分,并且以局部损失为主,占到管线总水头损失的 80% 以上。基于污水处理全流程水头损失的特点,在建立理想水力计算模型时,首先要考虑对构筑物出口处的跌水损失进行有效回避。连接管线应简洁布置,尽量减少连接管件的数目。在连接管线的水损计算中,一定要保证水损计算的精确性,尤其是局部损失计算时,一定要做到对局部损失系数的准确把握。

为了使优化后的水力布置更加具有对比性和较强的实用价值,在 A 厂原设计流程的基础上对

其进行了优化布置。在设计校核流量时,构筑物末端仍采用堰口出水方式,但取消污水处理构筑物末端堰口跌水高度,直接淹没流进入出水井。在二沉池前各处理构筑物末端均采用这一原则,最后二沉池出水采用原三角堰槽汇水,跌入排水渠。这样避免了在最大流量下构筑物末端由于跌水造成的水位差。沿程损失采用 ARTS Hydraulics 软件进行计算;局部损失运用经典水力学公式进行计算,并通过 FLUENT 软件模拟计算进行验证。模型计算结果显示,优化水力布置后曝气沉砂池的高程为 40.536 m,而原水力流程图的设计数值为 42.500 m,优化后的水力布置比原设计值减小了 1.964 m,如图 3 所示。按理论推算,每年可节省电量 $1\ 302 \times 10^3 \text{ kW}\cdot\text{h}$,可节约人民币 79.4 万元(A 厂电价为 0.61 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$)。

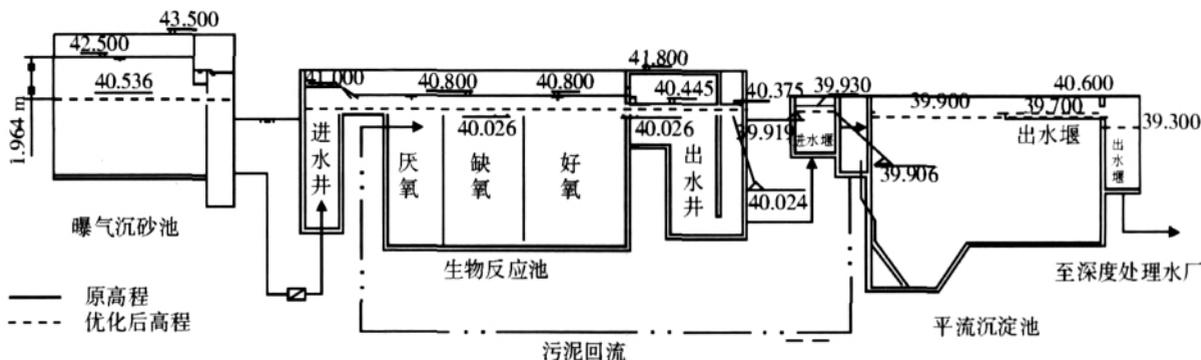


图 3 优化水力布置后模型计算水力高程图

Fig.3 Altitude chart of water level according to optimized model

由于污水提升静扬程变化幅度较大,管道特性曲线发生改变,水泵工况点往往脱离设计高效区,致使进水泵长期处在低效工作状态下,从而浪费电能。如,A 厂污水进水泵 4 用 2 备,根据进水泵 2008 年上半年电耗数据计算得出该厂污水进水泵的实际运行效率 η_1 只有 50%。水泵设计效率 η 为 77.3%,实际工作效率与设计效率相差较大,进水泵实际运行效率较低,从设计角度进行节能空间较大。A 厂原污水进水泵扬程是完全按照最不利条件计算设计,但是,一天中污水处理厂进水泵扬程只有不到 10% 的时间符合这一条件。污水提升高度在一天中平均提升高度为 11 m,而且持续时间较长,从上午 11 时一直到午夜,污水提升高度基本上都是围绕 11 m 上下浮动。另外水泵压水管路沿程损失为 0.26 m,2 个 90 度弯头局部损失为 0.18 m,适量取水头余量 0.5 m。所以,A 厂进水提升泵理想扬程设计最后取 12 m 就能满足要求,比该厂原设

计扬程(15 m)减少 3 m。所以,就设备选型和运行效率而言,理想设计扬程具有很大的节能和经济优势。

3 鼓风机节能

由于鼓风机在整个水区的电耗达到 62%,因此采用精确曝气流量控制进行节能十分重要。精确曝气流量控制系统是一套集成的智能控制系统,系统包括溶解氧控制、出水氨氮浓度控制、鼓风机调节和空气流量分配等一系列针对 A/A/O 工艺曝气系统核心工艺环节或设备的模块,为曝气系统提供自动化、精确化的曝气解决方案。该控制系统可以使各种复杂的供气方案得以实现,间歇曝气、微量曝气、正常曝气、溶解氧分布控制、好氧体积的动态控制等。从而实现 A/A/O 工艺的精细调节,适应各种工艺,并能够随着工艺变化而调整。控制原理如图 4 所示。

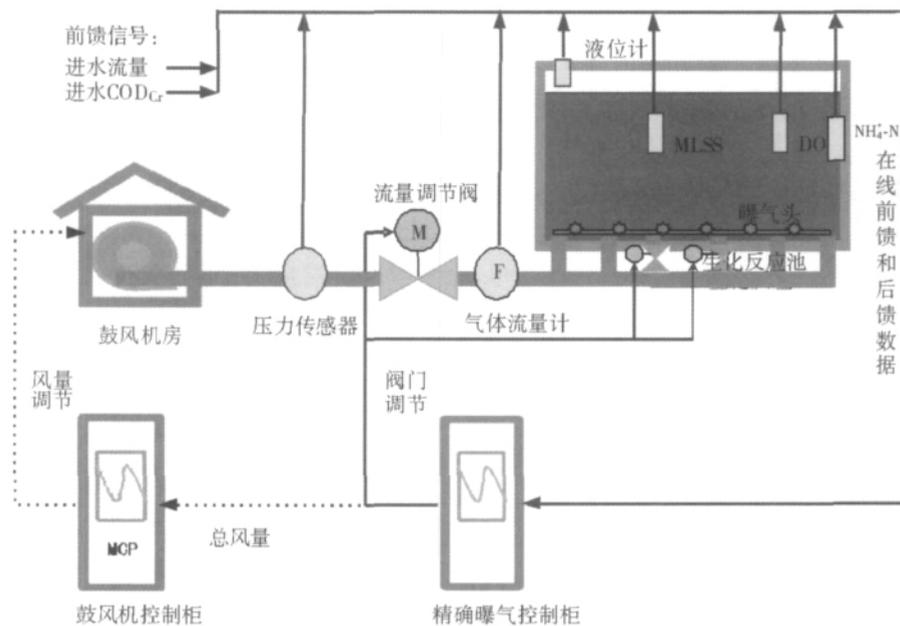


图4 精确曝气流量控制系统原理示意图

Fig.4 Sketch map of control system for smart aeration

该控制系统主要包含以下三项关键技术：“前馈+后馈+控制模型”组合控制技术：以污水厂进水区的进水流量、进水 COD_{Cr} 作为前馈信号、生化处理池中溶解氧检测仪、氨氮检测仪、污泥浓度计、液位计、温度、pH 值等作为反馈信号、发出阀位控制指令给各个流量调节阀的电动执行机构，发出总风量、风压指令给鼓风机总控制柜。该系统可实时计算维持当前好氧生化环境所需的供气量，使运行过程能耗与实际需求相匹配，实现按需供气，提高运行系统的能源效率。

鼓风曝气系统配气调节技术：污水厂往往包括多个并行的生化处理单元，鼓风机通过总管向每个生化单元供气。不同的处理单元在相同时刻的需气量有所不同，同一个处理单元在不同时刻的需气量也会变化。该技术的本质为：如何合理的调节不同阀门之间的开度组合，既可以满足不同生化处理单元的曝气流量需要，同时又使得调节造成的压力损失最小，使鼓风机能耗最低。

好氧体积控制技术：一方面污水厂出水中氨氮含量的波动比较明显，从而影响出水总氮浓度。另一方面进水污水中过低的氨氮含量，造成污水处理过程中电耗的浪费，同时消耗了大量可以利用的生物细胞内的碳源，造成进水中碳氮含量比较低的污水处理厂因碳源不足而难以完成反硝化，从而使出水氮磷超标，达不到污水处理的要求，或者不得不增加大量的外加碳源，造成运行成本的提高。本技术的主要原理是在硝化速率基本不变的情况下，通过改

变好氧池的体积使硝化反应时间发生变化，控制硝化程度，使出水氨氮维持在设定值。另一方面，维持合理的出水氨氮浓度可以防止过度曝气及胞内碳源的氧化，从而可节约电耗，并维持胞内碳源用于反硝化和释磷，实现稳定的同步生物脱氮除磷。

实施控制前后的 H 池曝气变化情况(见图 5)表明，实施控制前溶解氧变化幅度较大，而实施控制后溶解氧比较稳定，稳定的溶解氧控制也带来了明显的节能效果(见图 6)。由于进水流量一天内有周期性的变化，因此造成了水量大时溶解低于正常水平，而水量小时又过度曝气，而且为了维持生物反应池有足够的溶解氧，往往根据大水量确定供气量，因此无控制的 G 池其供气量基本恒定，均值为 $1.62 \times 10^4 \text{m}^3/\text{h}$ 。有控制的 H 池的供气量随着进水量的变化而周期性的变化以维持恒定的溶解氧浓度，并且总供气量要小于无控制的 G 池，均值为 $1.08 \times 10^4 \text{m}^3/\text{h}$ 。可见，相对于传统依靠人工控制的鼓风曝气方式而言，采用精确曝气技术后实现了 33% 的节能率。

通过调节出口导叶可以使鼓风机的供气量发生相应的线性变化，现场通过变化其中一台鼓风机的出口导叶，发现出口导叶开度与电流有较好的线性关系(见图 7)。因此鼓风机的供气量与鼓风机的电流和功率有较好的线性关系，而且鼓风机在整个水区的电耗达到 62%，因此采用精确曝气流量控制后可以实现 20.5% 的节能，这与 Ömerth 应用自动控制技术使具有营养物质去除功能的污水处理厂节能

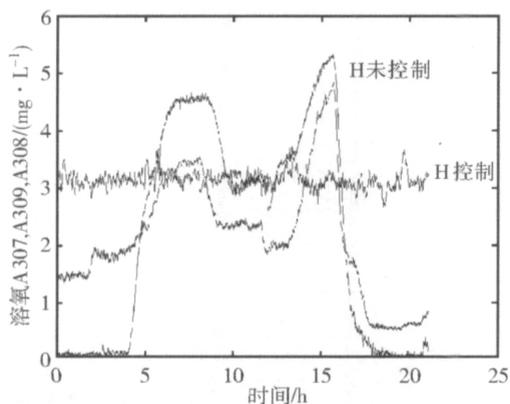


图5 实施控制前后 H池溶解氧的变化情况

Fig.5 Variation of DO in H tank with or without control

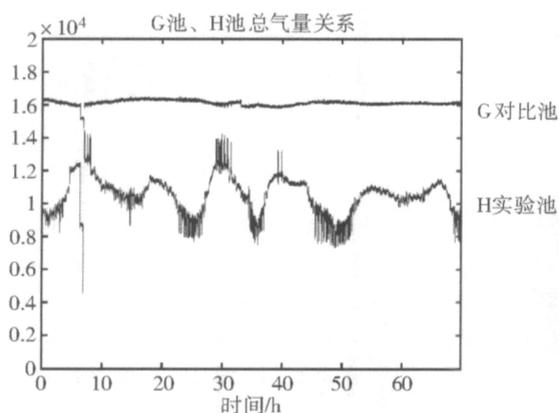


图6 有控制的 H池与无控制的 G池的流量对比

Fig.6 Comparison of air flow rate in H tank with or without control

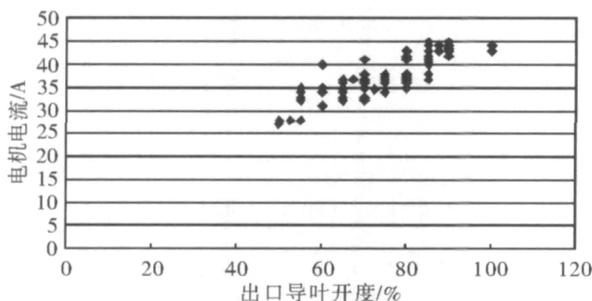


图7 出口导叶开度与电机电流的关系

Fig.7 Relation between opening degree of outlet leaf and electrical current of electromotor

4 二沉池运行优化与节能

沉淀池设计时常常采用经验方法,即根据规范或其它准则,参照类似实际运行沉淀池的参数,选用较长的停留时间或较低的表面负荷率来设计,这很难达到最佳运行状态,从而使外回流量偏大。状态点分析法是固体通量理论的扩展和延伸,在固体通量的理论基础上,以状态点图作为工具来分析和优化污水厂二沉池的运行,是一种便捷有效的分析方法。状态点分析法以状态点图作基础,状态点图(图8)

包括静沉通量曲线、底流率直线和溢流率直线,底流率和溢流率线的交点被定义为状态点,反映了二沉池内流量平衡关系^[3-4]。

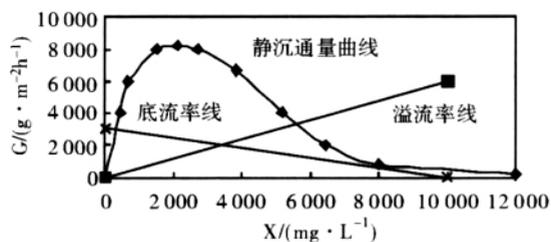


图8 二沉池状态点图

Fig.8 State point of secondary sedimentation tank

在高碑店中试厂对污泥回流比值分别为 60%、100%两种状况进行了中试试验,为了确保污泥性能的稳定,调整污泥回流比一周后再开始取数据。图9为中试厂在两次不同污泥回流比情况下的状态点图,可见在污泥回流比为 60%和 100%时静沉通量曲线基本相同,状态点也基本未变。但是,100%回流时底流率线离静沉线较远,底流浓度较低,而 60%回流时,底流率线更加靠近静沉曲线,底流浓度较高,出水 SS 基本没有变化。可见通过减少回流污泥量,优化了二沉池运行状态,出水中 SS 含量稳定在 12 mg/L 左右,完全达标,同时减少了外回流泵的能量消耗。

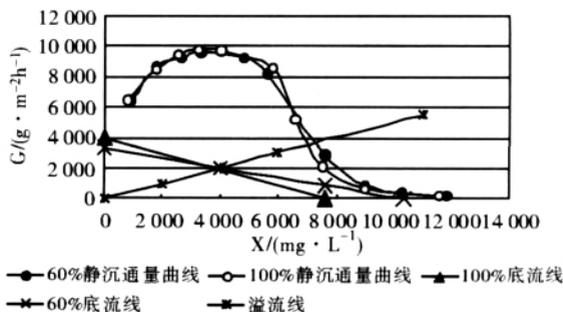


图9 不同回流比对状态点的影响

Fig.9 Influence of different return sludge ratio on state point

5 结论

水区是 A/A/O 工艺全流程节能的重点,包括预处理和二级处理单元的节能降耗,主要耗能设备是鼓风机、进水提升泵、内外回流泵。鼓风机在整个水区的电耗达 62%,进水泵、回流泵等各种泵的电耗占 32%。

A/A/O 工艺由于其推流式的流态,造成其流程较长,包括沿程阻力、局部阻力和跌落在内的高程落差较大。应用 ARTS Hydraulics 软件和 FLUENT 软

(下转第 57 页)

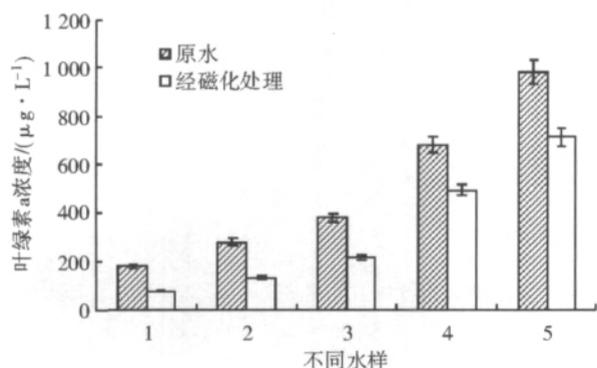


图5 初始叶绿素 a 浓度对磁化处理效果的影响

Fig.5 Effect of initial chlorophyll-a concentration on magnetization operation

率略有下降,但是降低的斜率不大。在叶绿素 a 浓度 700 $\mu\text{g/L}$ 以上时,去除效果有明显的下降,去除率只有 27%。在图中也可以看到,随着原水叶绿素 a 浓度的升高,磁化处理的去除率效果增加不明显。推测认为可能是由于场强相同,循环时间一样的条件下,作用于水体中的磁场能量相同使得磁化处理对于水中藻类去除能力基本相同,从而使各个不同水样中叶绿素 a 浓度的降低值相差不大。

3 结论

(1)强磁场化处理可以在短时间内去除藻类,去除效率可达到 60%左右,且对低浓度藻类的处理效果优于高浓度藻类。

(2)随着强磁场处理时间的延长,叶绿素 a 去除效率也上升。在水样流速为 3.78 m/s,循环时间为 360 min 时,藻类的去除效果比较好。

(3)强磁场化处理的时间、流速对灭藻的效果有

明显的影响,一般来说,流速越大,强磁场化处理时间越长,灭藻的效率越高。

参考文献

- [1] Paerl H W.. Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and climatic perturbations [J]. Ecological Engineering, 2006, 26(1): 40-54.
- [2] 赵爽, 杨硕. 除藻技术及藻类的资源化研究 [J]. 市政技术, 2009, 27(1): 53-57.
- [3] 杨曼, 吴小刚, 张维昊, 等. 富营养化水体生态修复中水生植物的应用研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(7): 98-100.
- [4] 陈杰, 王波, 张光明, 等. 超声强化混凝去除蓝藻实验研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(3): 66-69.
- [5] 谭水成, 里鹏, 陈莉. 利用超滤法去除藻类的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(4): 73-75.
- [6] 赵旭, 王茹静, 曹瑞钰, 等. 强磁场技术在景观水体中灭藻的应用研究[J]. 净水技术, 2006, 25(1): 55-57.
- [7] Holysz L, Szczes A, Chibowski E. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 316(2): 996-1002.
- [8] 任月明, 张密林, 赵翠, 等. SBR 磁化生物工艺处理生活污水[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(6): 711-714.
- [9] Rocher V, Siauque J-M, Cabuil V, et al. Removal of organic dyes by magnetic alginate beads [J]. Water Research, 2008, 42(4-5): 1290-1298.
- [10] Kitazawa K, Ikezoe Y, Uetake H, et al. Magnetic field effects on water, air and powders[J]. Physica B: Condensed Matter, 2001, 294-295: 709-714.
- [11] 王逸云, 王长海. 无菌条件下的小球藻培养条件优化[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2006, 19(2): 125-129.
- [12] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

(上接第 43 页)

件模拟计算表明,优化后的水力布置比原设计值减小了 1.964 m。而通过合理设计污水提升高度,优化进水泵的实际运行效率,可以使 A 厂进水泵的设计扬程减少 3 m。

鼓风机的电流与出口导叶的变化线性相关,因此可以通过 DO-风量-压力-出口导叶的联动系统调整风量,从而实现节能。由于进水量的周期变化,采用精确曝气技术通常比依靠传统人工控制的鼓风机曝气节约 20%~40%的气量,在鼓风机风量可调节的情况下,相应地可以实现鼓风机 10%~20%的节电率。

通过状态点分析法可以优化二沉池的运行效

率,从而在保证生物池的处理效果和出水 SS 值的前提下,减少外回流量,实现外回流泵的节能。

参考文献

- [1] 张自杰. 排水工程(下). 中国建筑工业出版社, 第四版: 425-426.
- [2] T. B. Önerth, M. K. Nielsen, C. Stamer. Advanced computer control based on real and software sensors[J]. Water Science and Technology, 1996, 33(1): 237-245.
- [3] G.A Ekama, P Marais. Assessing the applicability of the 1D flux theory to full-scale secondary settling tank design with a 2D hydrodynamic model[J]. Water Research, 2004, 38(3): 495-505.
- [4] JR Messenger, JC Smith, MJ Tetreault. The use of dynamic BNR and two-dimensional clarifier modeling to investigate nitrogen removal at eastern treatment plant, Melbourne, Australia [J]. Water Science and Technology, 39(6): 89-96.