

## 问题探讨

城镇污水处理厂氧化沟工艺节能  
技术措施探讨

杨根权

(煤炭工业合肥设计研究院,安徽合肥 230041)

**摘要:** 通过氧化沟工艺运行过程中的能耗实测数据分析了各处理单元中具有节能潜力的环节和潜在问题,提出解决方案并进行了现场试验。调研结果表明:生化、污水提升、回流、污泥处置等单元能耗分别占氧化沟工艺总能耗的65%~80%、10%~25%、5%~8%和1%~3%。结合具体案例,讨论了氧化沟工艺节能降耗的适用措施和相应的节能效果。

**关键词:** 氧化沟;能耗;节能;技术措施。

**中图分类号:** X703

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-8759(2018)06-0044-06

**DISCUSSION ON ENERGY-SAVING TECHNICAL  
MEASURES FOR OXIDATION DITCH PROCESS IN URBAN  
SEWAGE TREATMENT PLANT**

YANG Gen-quan

*(Hefei Design and Research Institute of Coal Industry, Hefei 230041, China)*

**Abstract:** Based on the monitored data of energy consumption, the energy-saving potentials and problems during the operation of oxidation ditch process were studied. Solutions were proposed and tested through field tests. The results showed The energy consumption of biochemical process, sewage pumping, sewage recirculation, sludge disposal was 65%~80%, 10%~25%, 5%~8% and 1%~3% of the total energy consumption of oxidation ditch, respectively. Combined with some specific cases, the applicable measures for energy saving and consumption reduction of the oxidation ditch process and the corresponding effects were systematically expounded.

**Key words:** Oxidation ditch process; Energy consumption; Energy saving; Technical measures.

城镇污水处理厂是我国水污染防治的主要途径,但在其改善水环境的同时,一直伴随着运行能耗高的问题,电耗成本约占污水处理厂运营维护成本的60%~90%。资料表明,城镇污水处理厂已处于我国高能耗行业的前十位,污水处理能耗大约占全社会电能耗的0.3%<sup>[1]</sup>。高能耗直接导致

污水处理成本升高,造成一些中小型污水处理厂的运行难以为继,很大程度上影响了水污染治理的成效。

我国污水处理厂的节能研究已开展多年,但各类节能研究相对独立,缺少统一的组织单位及定量考核机制,节能工作的进展和效果并不理想;且长期以来,污水处理主要依赖政府买单,从规划设计到运行管理,能耗问题一直未真正得到应有的重视。随着人口的增长和污染物排放标准的不断提高,以及新一轮对乡村污水治理力度的加大,

收稿日期:2018-10-11

作者简介:杨根权,男,47岁,1993年7月毕业于河北工程大学给排水专业,现就职煤炭工业合肥设计研究院,高级工程师,注册公用设备师(给水排水)、环保工程师、城市规划师,长期从事水处理及环境工程设计。

未来 10 年内用于污水处理的电耗将显著增加,如果高能耗问题得不到解决,污水处理行业将陷入严重的困境。

2015 年 3 月 1 日,北京市开始实施地方标准《城镇污水处理能源消耗限额》(DB/T1118-2014),这是我国首个针对污水处理能源消耗限额的标准,标志着我国污水处理厂的节能管理步入一个新的历史阶段。新的形势下,充分发掘城镇污水处理厂的节能潜力,不仅仅有利于节约社会资源,对于发挥污水处理厂环境效益、实现污水处理行业可持续发展更具有重要的现实意义。

## 1 氧化沟工艺

文章就国内广泛应用的氧化沟处理工艺作节能技术措施探讨。

氧化沟属活性污泥法中的延时曝气法,具有工艺流程简单、管理方便、出水水质稳定、耐冲击负荷、曝气设备充氧效率高、搅拌力强等优点。

根据杨凌波等<sup>[2]</sup>对我国 559 座运行污水厂的调研结果,按数量排序,居前三位的处理工艺依次为氧化沟、SBR 和 A<sup>2</sup>O 工艺,分别占二级污水处理厂的 32.1%、20.2%和 14.7%;按处理能力排序,前三位依次为氧化沟、A<sup>2</sup>O 及 A/O 工艺,分别占二级处理的 26.2%、19.1%和 17.1%,充分表明氧化沟已成为国内最具代表性的污水处理工艺。

但氧化沟低污泥负荷和长污泥龄的特点,导致其在运行能耗上并不具优势,吨水平均能耗为 0.302 kWh/m<sup>3</sup>,高于 A<sup>2</sup>O (0.267 kWh/m<sup>3</sup>) 和 A/O (0.283 kWh/m<sup>3</sup>) 工艺,也高于我国污水处理行业平均能耗 0.290 kWh/m<sup>3</sup>,反之也说明氧化沟工艺具有较大的节能潜力。

## 2 工程调研及能耗分析

### 2.1 调研情况

为探讨氧化沟工艺的能耗特征及节能措施,笔者选择了安徽省内 6 座采用氧化沟工艺的污水处理厂(其中有 3 座笔者主持设计)进行实地调研,通过实测各厂运行过程中能耗的组成及比例,分析研究各处理单元中具有节能潜力的环节及存在问题,针对性采取相应的节能实施方案,结合试验运行数据进行对比分析,提出污水处理厂氧化沟工艺节能降耗各项适用措施。

### 2.2 氧化沟工艺能耗构成

按氧化沟处理工艺流程及功能分区,分别统计提升段(含预处理)、生化段(曝气及推流)、回流段、污泥处置段的能耗(办公用电属建筑节能,本文不作讨论),调研的 6 座污水处理厂基本情况及能耗构成详见表 1。

表 1 调研各污水厂基本情况及能耗构成一览

序号	I	II	III	IV	V	VI
处理工艺	一体化氧化沟	奥贝尔氧化沟	卡鲁赛尔氧化沟	卡鲁赛尔氧化沟	卡鲁赛尔氧化沟	奥贝尔氧化沟
曝气方式	微孔曝气	曝气转碟	倒伞	曝气转碟	倒伞	曝气转碟
设计规模(万 m <sup>3</sup> )	2.5	2.5	3.0	6.0	18.0	2.5
处理水量(万 m <sup>3</sup> )	2.0	1.5	2.1	5.4	15.0	1.8
建成时间	2008.12	2008.3	2009.2	2002.9	2004.1	2009.10
执行标准	一级 B	一级 B	一级 A	一级 B	一级 A	一级 B
进水 COD(mg/L)	200~350	150~250	150~180	150~300	150~400	100~200
出水 COD(mg/L)	25~45	20~40	20~30	20~45	10~40	15~40
出水 NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	0.5~2.5	0.5~2.0	0.8~2.0	0.5~3.0	0.2~2.0	0.8~3.5
能耗总计(Kwh/d)	5 121	6 950	8 186	13 828	42 048	5 996
提升段能耗(%)	24.9	11.7	14.9	24.6	5.1	13.7
生化段能耗(%)	65.6	77.7	79.8	66.6	92.1	76.0
回流段能耗(%)	6.6	8.3	4.4	7.8	1.9	7.0
污泥段能耗(%)	2.9	2.3	0.9	1.0	0.9	3.3
单位水量能耗(Kwh/m <sup>3</sup> )	0.26	0.46	0.39	0.26	0.28	0.33
单位 COD 能耗(Kwh/Kg)	1.07	2.73	2.78	1.24	1.12	2.72

### 2.3 能耗分析

调研结果显示,氧化沟工艺各单元能耗占总能耗的比例符合以下特征:生化段耗能最大,占总能耗的比例基本在 65%~80%之间;污水提升段次之,约占总能耗的 10%~25%;回流段约占 5%~8%;污泥处置段能耗相对较小,基本在 1%~3%之间。上述氧化沟工艺的能耗构成符合一般特征,周鑫<sup>[3]</sup>、向阳<sup>[4]</sup>等在相关研究中也有类似结论。

表 1 显示 III 厂、V 厂生化段能耗较高,分析原因是两厂的出水水质标准较高,工艺流程中包含深度处理单元。资料表明,出水水质由一级 B 标准提高到一级 A 标准,相应能耗约增加 25%~35%<sup>[3][5]</sup>。

表 1 中各厂提升段能耗占总能耗的比例差异也较大,这与污水厂选址、污水管网埋深及中途泵站设置等有关;此外,表 1 还反映出污水处理厂规模越大吨水电耗值相应越低的特征。

### 2.4 存在问题

从调研的 6 座采用氧化沟工艺污水处理厂的运行情况看,主要存在以下问题:

#### 2.4.1 运行能耗高

我国氧化沟污水处理工艺平均单位水量能耗为 0.302 Kwh/m<sup>3</sup>,而调研的 6 座污水处理厂中有

3座高于平均值(单位COD能耗类似)。分析3座污水处理厂规模,均小于3万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,属于小型污水处理厂,说明运行能耗存在较为明显的规模效应。

周鑫等<sup>[3]</sup>认为设计规模小于5万 $\text{m}^3/\text{d}$ 时单位水电耗受规模影响较大;孙鹏程等<sup>[5]</sup>认为规模不超过0.5万 $\text{m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂平均能耗水平是规模大于10万 $\text{m}^3/\text{d}$ 污水处理厂的两倍以上。而我国城镇污水处理厂以中小型(小于5万 $\text{m}^3/\text{d}$ )为主,这些水厂在水污染防治中所起的作用至关重要,因此,中小型污水处理厂的高能耗问题更需要引起关注和重视。

#### 2.4.2 溶解氧过高

调研的6座氧化沟普遍存在运行溶解氧(DO)过高的情况。参照设计手册和其它厂运行经验,氧化沟内的溶解氧达到2 $\text{mg/L}$ 即可,但各厂实测溶解氧浓度均高于该值,有的甚至达到7 $\text{mg/L}$ 以上。

溶解氧过高的主要原因有两个,一是DO检测仪日常疏于清洗且得不到有效校正,仪表值与实验室测量值之间存在不同程度的偏差;另一原因是各厂实际处理水量小于设计规模,且进水水质浓度偏低,造成进水负荷较低,而设备运行依然参照设计负荷,一定程度上导致氧化沟溶解氧偏大以及能耗的浪费,特别是采用曝气转碟的氧化沟,为了保证推流、防止污泥在沟内沉积,转碟基本处于满负荷运行状态。

#### 2.4.3 设备工况

污水处理设备未处于最佳运行工况也是造成能耗增加的原因之一,特别是曝气转碟或倒伞、提升泵、风机等,是否在高效区运行需要通过调试确定。例如调研中II厂曝气转碟的能耗(电流)较高,分析原因与转碟浸没深度有关,就此进行试验判断。该厂转碟直径1400 $\text{mm}$ ,设备资料推荐浸没深度范围为400~530 $\text{mm}$ ,现场运行采用510 $\text{mm}$ 。在进水水质及水量基本稳定条件下,调整浸没深度,随着转碟浸没深度增加,溶解氧浓度逐渐增加,表明转碟设备充氧能力随浸没深度增加而提高,同时设备运行电流也逐渐增大,当浸没深度超过500 $\text{mm}$ 时,出现运行阻力突增导致电流增加过快的现象,结合现场试验数据,最终将转碟的最佳浸没深度调整为480 $\text{mm}$ 。

#### 2.4.4 水头浪费

各厂还普遍存在水头浪费现象,国内在污水

厂竖向设计时,各处理构筑物设计水头损失一般按给水排水设计手册进行估算,数值相对保守,设计采用值均偏高,构筑物之间的水位差较实际所需水头损失有较大的富余,调研的6座污水厂总水位差均在3.0~4.0 $\text{m}$ 之间,而欧美及日本等一些发达国家的污水厂总水位差仅在2.0 $\text{m}$ 左右,水头浪费导致提升水泵扬程增大、能耗增加。

II厂、VI厂后期经提标改造,在原处理工艺流程中增加了转盘过滤机(水头损失约0.7 $\text{m}$ ),仅利用了富余水位差,未另外增加提升装置,可见原构筑物之间的水位差具有足够的压缩空间。

#### 2.4.5 节能管理

另一个普遍存在的问题是节能管理,现阶段国内对污水处理厂节能管理主要依赖发改部门的项目可研节能评估审查,2010年《固定资产投资节能评估和审查暂行办法》开始实施,对污水处理厂节能工作是一个很好的促进,但后续的工程建设、调试、验收、运行管理等过程中,缺少配套的能耗审核、考核体系及指标,节能评估和审查所起的作用非常有限。

尽管如此,在规划设计阶段选择确定有效的节能技术措施,依然是污水处理厂节能管理的基础。

### 3 节能技术措施

根据前文对氧化沟处理工艺能耗构成分析,耗能最大的处理单元是生化曝气段,占总能耗的比例基本在65%~80%之间,因此节能技术的应用还是集中在氧化沟生化处理单元,其次是污水提升、污泥回流及污泥处置。

#### 3.1 曝气方式的选择

节能措施首先要考虑曝气方式,氧化沟曝气方式有鼓风曝气和机械曝气两种,其中鼓风曝气系统氧利用率较高,具有明显的节能效果。I厂就是一个例子,该厂采用微孔曝气方式,生化段的吨水电耗值仅0.17 $\text{Kwh}/\text{m}^3$ ,显著低于其它各厂。

目前使用的微孔曝气器,可以实现大面积的细小气泡曝气作业,产生的气泡细小且密集,气泡上升速度减小,延长了与水接触的时间;另一方面,气泡粒径减小,增大了气泡与水的接触面积,有利于增加氧的传递效率;此外,细小气泡更易于附着在活性污泥上,加速微生物对气泡中氧气的直接利用,大大提高了曝气系统动力效率,可达到

4 kgO<sub>2</sub>/Kwh 或更高,氧的利用率(EA)可高达 35%~60%<sup>[6]</sup>。

鼓风曝气系统节能优势明显,但在应用上却不如机械曝气普遍,主要原因是曝气孔易堵塞、维护管理不便,因此鼓风曝气更在于提高微孔曝气系统的可靠性及适应性。

机械曝气因不需另建鼓风机房、设备数量少、易于控制调节、维护管理方便等优点,使用相对较多,调研的 6 家污水厂中有 5 家采用机械曝气。经多年发展,表面曝气设备由最初的转刷改进为转碟曝气机和倒伞型曝气机两种常用形式,动力效率明显提高,基本在 2~3 kgO<sub>2</sub>/Kwh 之间,从调研结果来看,倒伞型曝气机在稳定性及节能方面更优于转碟曝气机。

### 3.2 曝气量的控制

控制曝气量的方法是控制氧化沟内的溶解氧(DO)浓度,常用的方式是通过 DO 检测仪反映的数据判断曝气量是否过量,再适时调整风机或曝气设备的输出功率,使溶解氧始终处于合适的浓度范围内,达到自动控制和节能运行的目的,能耗一般可降低 10%~30%<sup>[7]</sup>。目前实际应用中还存在不尽人意的地方,如能在运行中加强 DO 检测仪的校正以及仪表数值和实验室数值之间的修正,利用溶解氧来精确控制曝气量还是非常实用的节能途径。

曝气设备可设计为定速与变频相结合的方式,且设备台数宜设置为多台,进水水质稳定时采用定速运行,水质有波动时辅以变频,较大波动时通过增加或减少运转台数来控制曝气量。

II 厂在调研期间进行了技术改造,针对进水负荷低溶解氧偏大能耗浪费的情况,在奥贝尔氧化沟的外沟增设了潜水推流器,低负荷时关闭其中 1 台转碟,替代为潜水推流器,在保证沟内流速及处理效果的前提下,外沟的运行功率由 66 Kw 降为 49.5 Kw。

### 3.3 低溶氧技术

低溶氧技术的节能效果明显,调研中 I 厂采用该技术,其生化段的吨水电耗值仅为 0.17 Kwh/m<sup>3</sup>,在 6 家污水厂中最低。按理论分析,生物池内的 DO 值达到 0.3 mg/L 即可以维持微生物的生理需要,低溶氧技术就是通过减少供氧量和需氧量之间的富余值来避免能耗的浪费。

I 厂氧化沟中的 DO 浓度始终控制在 0.1 mg/

L~0.3 mg/L 之间,低溶氧环境下(奥贝尔氧化沟的外沟也属于低溶氧环境)驯化形成的活性污泥絮体中主要是兼性厌氧微生物,生长速度较慢,吸附 COD 后不会在菌群团表面形成水化膜,污泥絮体通过接触微小气泡可以直接摄取氧气进行代谢,微生物获得氧的效率大大提高,比传统好氧工艺专性好氧菌种对氧浓度的需求要低得多。另一方面,在低溶氧环境下,氧的传递作用是在氧亏条件下进行的,氧传递效率也会提高。

此外,低溶氧环境的短程同时硝化/反硝化特征明显,氨氮硝化主要生成亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N),反硝化菌群可直接利用 NO<sub>2</sub>-N 进行反硝化脱氮,几乎没有 NO<sub>2</sub>-N 的积累及 NO<sub>3</sub>-N 的产生,去除一个分子的氨氮,短程硝化/反硝化要比全程硝化/反硝化少消耗 0.5 个氧分子,减少 25% 的需氧量,且短程硝化/反硝化可直接利用 NO<sub>2</sub>-N 还原为 N<sub>2</sub>,具备更高的反硝化速率<sup>[6]</sup>。

### 3.4 优化竖向布置

前文已提出污水处理厂竖向设计对能耗的影响,因此减小构筑物间跌水高度、优化污水处理厂竖向布置也是非常有效的节能措施,应在设计阶段予以重视。正确的方式是以远期最大流量来精确计算构筑物和管渠的水头损失,结合工况分析,合理确定各构筑物高程及提升泵的扬程。

国内还有对各构筑物间出水方式进行研究的,大多数污水厂的构筑物出水方式为堰口出水,跌水的存在会浪费部分能量,如果将堰口出水方式改为淹没出流方式,只在二沉池设出水堰控制全厂水位,总跌水高度可以减少 1.2 m<sup>[8]</sup>。

### 3.5 设备运行优化

污水处理厂设备运行优化也具有显著的节能效果,根据水泵、风机、转碟、倒伞等主要耗能设备的技术规格和实际运行情况,分析和优化设备运行参数,确保设备处于高效工作状态,例如前文提到的转碟最佳浸没深度、转碟+推流器组合运行方式以及变频技术等。

污水提升泵组常用的节能措施也是变频调速技术,根据来水量的变化调节水泵转速,保证水泵始终保持在性能曲线高效区运行,流量出现较大波动时以增减运行台数作为辅助调节。II 厂通过技改增加污水泵变频装置,取得较好的节能效果。另一方面,采用变频技术,可以避免水泵在极端水位运行,也就避免了水泵的频繁启动,而启动电流

往往高出额定电流很多,这也是减小水泵运行能耗的一个原因。

对于风机,大多根据溶解氧(DO)浓度,通过变频调速来达到降耗目的。近年来,风机设备的结构和性能也有了多方面改进,特别是悬浮技术(轴承)的应用,克服了机械摩擦,实现电机高速旋转,不仅设备外形减小、低噪环保、安装维护便捷,更重要的是节省能耗,比传统离心风机和罗兹风机的效率提高15%~30%,目前磁悬浮风机和空气悬浮风机在污水处理工程中的应用已越来越广泛。

### 3.6 污泥回流

传统活性污泥法的回流污泥量一般为进水流量的25%~100%(对于稳定的进水水质,回流比基本是一个定值,可通过计算并结合现场运行调试确定最佳回流比),虽然回流量相对较大,但所需扬程较低,总能耗也相对较低。因此,采取控制回流比、变频控制等措施对节能降耗的贡献并不大,相比之下污泥回流泵的选型更为重要。多数污水厂为安装方便,污泥回流泵采用的是潜污泵,但在大流量、低扬程条件下,潜污泵的效率相对较低,一般仅为60%左右,而如果选择轴流泵,效率可高达80%以上。

### 3.7 一体化技术

前节讨论的污泥回流需要设独立的回流系统,事实上要大幅度降低污泥回流能耗,最好的办法是用一体化技术代替单独的污泥回流系统,如采用一体化氧化沟、三双或双沟式氧化沟。

一体化技术就是用合建的生物反应池取代传统工艺中的氧化沟、二沉池、污泥回流泵房等构筑物,使多个池体简化为一个综合池体,在综合池中高效完成碳源氧化、硝化、反硝化、磷的去除以及处理水的固液分离。综合生物反应池中设有沉淀区,沉淀污泥落于沉淀区下方,通过混合液回流,将沉淀区下方污泥带回生物反应池进水端,实现污泥自动回流,可大大降低运行能耗。此外,一体化技术还可以减少管路水头损失及构筑物之间水位差。

调研中的I厂采用一体化氧化沟工艺,没有设独立的污泥回流系统,因省去机械回流,比传统氧化沟法可节能15%左右<sup>[6]</sup>。

### 3.8 剩余污泥处置

目前国内大多数污水处理厂对剩余污泥的处

置还限于浓缩、脱水过程,根据调研结果,该部分所占总能耗的比例很小,基本在3%以下,扣除剩余污泥泵、冲洗泵、皮带输送机、加药设备等,污泥脱水设备的能耗不到2%,且污水厂规模越大,相应比例越小。因此污泥脱水工艺及设备选型对全厂总能耗影响较小。总体来说,带浓缩段的污泥处置工艺的能耗小于直接脱水工艺;不同污泥脱水设备的能耗差别也很小,其中转鼓浓缩带式污泥脱水机能耗相对较小,优于传统带式脱水一体机、离心脱水一体机及板框式压滤脱水机。

### 3.9 节能效果

上述节能技术措施已经讨论很多并在工程实际中得以应用,事实证明能有效降低污水处理厂的运行能耗,特别是多种方式联合使用,系统能耗可降低30%以上。

以II厂为例,设计规模2.5万m<sup>3</sup>/d,在调研初期,实际日处理水量1.5万m<sup>3</sup>/d,平均单位水量能耗为0.46Kwh/m<sup>3</sup>,后期II厂采取多项节能技术措施,包括污水提升泵变频改造、调整转碟最佳浸没深度,以及低负荷时采用转碟+推流器组合运行方式,有效控制氧化沟溶解氧浓度等,经跟踪调查,实施各项节能措施后,II厂的运行能耗大幅降低,平均单位水量能耗减少至0.26Kwh/m<sup>3</sup>,系统能耗降幅高达43%(能耗降幅较大的另一原因是运行负荷率有所提高,调查时实际处理水量接近2.1万m<sup>3</sup>/d,表明实际处理水量与设计规模越接近时,吨水电耗值也越低)。

### 3.10 其它

污水处理厂节能措施还包括新能源的开发利用,如太阳能、风能、生物能等洁净能源。近年来太阳能技术快速发展,特别是多晶硅和光伏技术,提高了光电转换的效率并大幅降低了太阳能的使用成本,使污水处理行业利用太阳能成为可能;且大多数污水厂均远离城区,日照较好,具备利用太阳能的优越条件,浙江、江苏、安徽等地的小型乡镇太阳能微动力污水处理工程已积累成功经验。

生物能也是一种值得推广的新能源,利用污水厂剩余污泥中的有机质,通过厌氧发酵产生沼气,再利用沼气发电减少市政电网的电力消耗。国内高碑店污水处理厂、天津市东郊污水处理厂、小红门污水处理厂、山东麦岛污水处理厂等沼气发电工程也已成功运行。

前面所提及的节能技术措施都只是针对污水

处理厂自身,事实上从宏观层面来说,节约水资源、推进污水再生回用更是顶层的节能措施,可以减小市政自来水厂规模及相应的基础设施投资;另外,回用水水质标准低于自来水,在净化处理、输配水环节的能耗也远小于自来水。但污水再生回用需要全社会的关注,更依赖于政府,需要政府制定完善的规划,从政策、管理、技术等层面全面重视并给予相应的政策扶持。

#### 4 结语

我国氧化沟污水处理工艺平均单位水量能耗为 0.302 Kwh/m<sup>3</sup>, 高于污水处理行业平均能耗 0.290 kWh/m<sup>3</sup>,由于规模效应的存在,中小型氧化沟类污水处理厂高能耗问题更为突出。

氧化沟工艺各单元能耗占总能耗的比例符合以下特征:生化段耗能最大,占总能耗的比例基本在 65%~80%之间;污水提升段次之,约占总能耗的 10%~25%;回流段约占 5%~8%;污泥处置段能耗相对较小,基本在 1%~3%之间。因此节能技术的应用集中在氧化沟生化处理单元,其次是污水提升、污泥回流及污泥处置。

合理选择曝气方式、精确控制曝气量、低溶氧技术、优化厂区竖向布置、优化设备运行、一体化技术等,均是氧化沟工艺适用的节能技术措施,可以有效降低污水处理厂运行能耗,特别是几种方式联合使用,系统总能耗可降低 30%以上。

#### 参考文献

- [1] 陈旭明.城镇污水处理厂节能降耗研究现状及发展趋势[J],节能,2018,(6),110-112
- [2] 杨凌波,曾思育,鞠宇平,何苗,陈吉宁.我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析与定量识别[J],给水排水,2008,34(10):42-45
- [3] 周鑫,郭雪松,刘俊新,王溢,王颖哲,侯红勋,常会庆,韩云平.氧化沟工艺城市污水处理厂的能耗特征研究 [J], 给水排水, 2011,37(8):31-34
- [4] 向阳,左涛,蔡昌凤,陈锦如,杨根权.基于层次分析法的氧化沟曝气方式研究[J],能源环境保护,2011,25(6):12-16
- [5] 孙鹏程,曾琳,曾思育,张天柱.山西省城镇污水处理工程能耗水平与特征研究[J],给水排水,2012,38(3):48-51
- [6] 杨根权.低能耗污水处理技术的应用 [J], 能源环境保护, 2010,24(2):22-26
- [7] 林荣忱,李金河,林文波.污水处理厂泵站与曝气系统的节能途径[J],中国给水排水,1999,15(1):21-23
- [8] 牛住元,张雅君,王文海.污水处理厂污水提升节能措施研究[J],给水排水,2009,35(5):155-158