

# 污水处理工艺能耗和节能趋势探讨

何卿<sup>1</sup>, 王琦<sup>2</sup>, 沈众<sup>1</sup>, 付益伟<sup>1</sup>

(1. 江苏省环境科学研究院, 江苏省环境工程重点实验室, 江苏南京 210036; 2. 北控安耐得环保科技发展常州有限公司, 江苏常州 213022)

**摘要** 污水处理属能耗密集型行业, 研究污水处理工艺的能耗和节能途径具有重要的现实意义。综述了国内外污水处理工艺概况, 从污水处理工艺能源审计、污水处理工艺能耗比较、污水处理工段能耗比较 3 个方面, 分析了我国污水处理工艺能耗情况, 最后阐述了城市污水处理工艺的节能途径, 包括曝气系统和污泥处理系统。

**关键词** 污水处理; 能耗; 节能; 发展

**中图分类号** S181.3; X703 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)26-0052-04

## Study on Energy Consumption and Energy-saving Trend of Sewage Treatment Processes

HE Qing<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>, SHEN Zhong<sup>1</sup> et al (1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing, Jiangsu 210036; 2. Beikong Annaide Environment Technology Development Changzhou Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213022)

**Abstract** Sewage treatment is an energy intensive industry, and it has important practical significance to study energy consumption and energy-saving approaches of sewage treatment processes. In this study, the general situation of sewage treatment processes at home and abroad was summarized firstly, and then the status of energy consumption of sewage treatment processes in China was analyzed from energy audit and energy consumption comparison of sewage treatment processes as well as energy consumption comparison of sewage treatment sections. Finally, energy-saving approaches of municipal sewage treatment processes including an aerating system and sludge treatment system were introduced.

**Key words** Sewage treatment; Energy consumption; Energy saving; Development

国家统计局初步核算, 2015 年全年能源消费总量为 43 亿 t 标准煤, 比 2014 年增长 0.9%。预计到 2050 年将超过 50 亿 t 标准煤, 但常规化石能源的实际供应力只有 30 亿 t 标准煤左右, 这不仅使能源供应不堪重负, 而且面临难以承受的环境压力。随着我国经济的快速增长, 能耗增加, 能源紧缺已成为制约我国经济社会进一步发展的因素之一。因此, 进一步强调新能源开发、节能优先及建设节能型社会是今后我国的重大国策。

污水处理属能耗密集型行业, 其消耗的能源主要包括电能、燃料等潜在能源。由于我国城市污水产生量巨大, 处理量也不断增加, 污水处理的能耗不容忽视。高能耗一方面易造成污水处理运营成本较高; 另一方面, 一定程度上加重了我国现阶段的能源危机。笔者比较分析了国内外污水处理的能耗现状, 并探讨了节能趋势, 以期为我国污水处理节能减排及资源化提供理论启示。

## 1 国内外污水处理工艺概况

自工业革命以来, 污水处理越来越受到人们的重视, 已从原始的自然处理、简单的一级处理发展到利用各种先进技术、深度处理污水并回用。处理工艺也从传统活性污泥法、氧化沟工艺发展到 A/O、A<sup>2</sup>/O、AB、SBR (包括 CASS 工艺) 等, 达到不同的出水要求<sup>[1]</sup>。目前, 污水二级处理普遍使用活性污泥法、生物膜法和生态处理法, 通过微生物的好氧代谢来完成污水中有机物的去除<sup>[2]</sup>。表 1 比较了国内外污水处理工艺的使用情况、运营费用和经济效益。国外积极研发出了一些更先进的污水处理技术和工艺, 1998 年, 日本开发出

能够有效清除工业和生活废水中氮化合物的生物反应器, 其可将氮化合物转换成氮气; 20 世纪 90 年代, 美国研发出成熟的电絮凝污水处理技术, 该工艺运行平稳, 水质稳定; 20 世纪末, 欧盟国家研究出了等离子体废水处理技术, 电耗比一般臭氧发生器低 10 倍以上。由于对污水条件要求过高或投入成本较大, 目前这些先进污水处理工艺尚未大规模投入使用。

相对于发达国家, 我国污水处理起步晚, 现有的污水处理厂普遍采用生物处理工艺作为主体工艺, 也有部分地区采用化学、物理强化一级处理、土地处理法等<sup>[3]</sup>。在生物处理工艺中, 广泛采用的是活性污泥法, 我国 80% 城市污水处理厂采用该工艺, 另外还有生物滤池和膜-生物反应器、生态处理法等污水处理工艺<sup>[4]</sup>。

## 2 国内外污水处理工艺能耗概况

污水处理的能耗与所处理的污水水量、水质、处理方法、处理程度及运转方式有关。总体而言, 污水处理的能源大多耗费在主要污染物的处理, 尤其是有机物的稳定化、无害化方面。能量作为维持城市污水处理中各种生物反应与污水处理厂正常运转的必要条件, 主要包括直接能耗(鼓风机曝气或机械曝气电机的电耗, 回流污泥泵、污水提升泵等的电耗, 污泥消化消耗的热能, 污泥脱水、搅拌推流机械的电耗等)和间接能耗(絮凝剂、活性炭、铝盐、氯气、石灰、外加碳源等耗材生产所需的能量)<sup>[5]</sup>。典型的二级城市污水处理厂电耗中, 污水提升、污水生物处理(主要用于曝气供氧)、污泥处理三者能耗之和占总直接能耗的 70% 以上<sup>[6]</sup>。

**2.1 污水处理工艺能源审计** 20 世纪 70 年代末, WPCF (Water Pollution Control Federation) 编撰的污水处理厂运行手册<sup>[7]</sup>中提出了城市污水处理厂节省能量的基本方案, 包括对各单元过程的用能分析和节能措施的制订。能源审计管理不仅能为处理厂运转提供可靠的基础数据, 而且可指导处

**基金项目** 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07504-004)。

**作者简介** 何卿(1973-), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 从事生态环境保护规划及水污染防治研究。

**收稿日期** 2016-07-15

理厂工艺方案的选择与节能改造。芝加哥都市卫生区<sup>[8]</sup>所辖各城市污水处理厂的节能降耗方案设计就得益于能源审计。国外对污水处理厂的能耗审计研究较为深入。20 世纪 70 年代末 Reardon 等<sup>[9]</sup>提出了城市污水处理厂能源审计的主要方法和实施步骤;Rushbrook 等<sup>[10]</sup>通过能耗和费用效益比较了延时曝气、生物转盘(好氧消化或厌氧消化)1 800 m<sup>3</sup>/d 的工艺流程,为政府的决策提供了科学依据;Evans 等<sup>[11]</sup>于 1994 年对加拿大安大略省主要的污水处理厂能耗状况进行了审计,确定具备节能潜力的过程或工序。

我国的能源审计工作比国外晚了几十年。1982~1985 年国家经济贸易委员会开展了《企业能源审计》的试点工作。1989 年我国首次对造纸、纺织、化工、炼油和水泥 5 个行业的

企业进行了能源审计,建立了一套定量的企业能源审计方法;1997 年国家技术监督局颁布了《企业能源审计技术通则》(GB/17166—1997)等 3 项有关企业能源审计的国家标准;2001 年河南省质量技术监督局颁布了《企业能源审计方法》地方标准(DB/T 270—2001)。羊寿生<sup>[12]</sup>结合设计经验,对我国典型一级、二级污水处理厂各单元过程进行了能耗(电能)估算,二级处理厂的能耗(电能)为 0.266 kW·h/m<sup>3</sup>(污水处理厂规模为 25 000 m<sup>3</sup>/d)。结果表明,我国城市污水处理厂能耗主要用于污水、污泥的提升、生物处理的供氧及污泥处理这几个工艺过程,其中污水生物处理和污泥处理的耗能量占污水厂直接能耗的 60% 以上。

表 1 国内外我国城市污水主要采用的处理工艺对比

Table 1 Comparison of main municipal sewage treatment processes in China at home and abroad

项目 Item	活性污泥法 Activated sludge process			生物膜法 Biofilm process		生态处理法 Ecological treatment method		
	A <sup>2</sup> /O 或 A/O	氧化沟 Oxidation ditch	AB 法 AB method	SBR 法 SBR method	曝气生物滤池 Biological aerated filter	生物转盘 Biological rotating disk	生态稳定塘 Ecological stabilization pond	人工湿地 Constructed wetland
工艺技术 Process	成熟	成熟、可靠	先进	先进	先进	先进	先进	先进
开发史 Development history	20 世纪 70 年代南非、美国开发	1954 年荷兰开发	1976 年法国开发	20 世纪 70 年代美国开发	20 世纪 80 年代末在欧美发展,1981 年法国投产	1954 年德国首先开发	1902 年美国首先修建	1974 年西德首先建成
国外应用 Application in foreign countries	近年来在发达国家迅速推广采用	德国 Passavant 公司的 Mammouth 深型氧化沟	法国、奥地利等国家应用较多	在欧、美、日、澳大利亚等国推广应用	20 世纪 80 年代末美国、加拿大等美洲国家首先引进	近 30 年在美、加、加拿大发展的 BRC 内置膜生物转盘	美国 AIPS 新型稳定塘	1994 年瑞典自由表面人工湿地;1997 年设计 Los Banos 除硝湿地
国内应用 Application in China	2002 年投建的山东东阿污水处理厂;2007 年改建的桂林第四污水处理厂	昆明第一污水处理厂;长沙市第二污水净化中心	20 世纪 90 年代初在外国贷款项目中应用	在上海、昆明、大连等地应用	2003 年建成的广东省江门市新会区污水处理厂	淮阴市北京新村污水厂	德州市城市污水处理厂;1993 年建成的汉沽生物稳定塘	云南九溪人工湿地;2009 年建成的莲花湖人工湿地
有机物 Organic matter	有效去除	有效去除	有效去除	有效去除	有效去除	有效去除	有效去除	有效去除
氮 Nitrogen	较高去除	较高去除	略高于传统法	较高去除	有效去除	有效去除	有效去除	有效去除
磷 Phosphorus	较高去除	较高去除	略高于传统法	较高去除	有效去除	有效去除	有效去除	有效去除
适用性 Applicability	除要求去除有机质外,对脱氮和除磷的场所要求较高	城市生活污水和工业废水、用地不紧张的场合、中小型污水处理厂	原水有机质含量高和城市生活污水、工业废水或水质目标分期达到的场所	城市生活污水和工业废水,有脱氮除磷要求、用地紧张的场合	用地面积严重不足或受到限制	中小型污水厂	场地较大,有生态池塘的地区	具有较大场地,湿地等
改良型 Improved type	A-A <sup>2</sup> -O/UCT	Carrousel 型、Orbal 型、DE 型、T 型	AB+电解	ICEAS、UNITANK、MSBR	BIOSTYR、Biofor、BIOSMEDI	空气驱动式、与沉淀池共建式、曝气组合式	好养塘、厌氧塘、曝气塘、兼性塘	潜流式人工合成湿地、地表流人工湿地
基建费用(工程投资) Infrastructure cost (Construction investment)	略高于传统法	低于传统法	与传统法接近	低于传统法	投资成本较大	设备简单	基建投资低	投资费用低
运行费用 Operating cost	略高于传统法	低于传统法,但耗电高	略高于传统法	低于传统法	药剂费用高	维护管理方便,转盘价格较高	成本低	耐冲击,运行简单
运行管理 Operation management	工序较多,对工艺系统的控制有较高的要求	工艺简单、构筑物少、不需污泥消化池,处理效果稳定,出水水质好,维护方便	工序多,操作管理较传统法复杂	占地和运行维护少,对自控有强烈的依赖性,需要较高的技术和管理水平	占地少,处理迅速,但药剂费用高,反冲洗难控制	机械操作简单易于操作,无需污泥回流,节省能耗,但转盘处理不当会导致出水变差	操作管理简单,但依赖环境条件、自然因素,占地大	维修管理简便,但占地面积大,易受病虫害危害
社会和环境效益 Social and environmental benefits	比传统法处理的水质更好	出水水质好,污泥、恶臭少	改善环境,处理后水可回用	出水水质好	节省用地,出水水质好	节省耗能	人工化的生态系统	改善生态景观

**2.2 污水处理工艺能耗比较** 我国现有污水处理厂工艺能耗统计结果见表2。由表2可知,各工艺污水处理能耗平均为 $0.304 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,其中能耗最大的是浙江绍兴污水处理厂,该厂采用传统活性污泥法,能耗为 $0.750 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;能耗最小的是广州某高级生活小区污水处理厂,该厂采用SBR工艺,能耗为 $0.050 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。就平均能耗而言,CASS和氧化沟工艺的能耗最小,均为 $0.240 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;其次是SBR法,能耗为 $0.270 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;A<sup>2</sup>/O的能耗最大,为 $0.390 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。可见,工艺对能耗的影响较大,通过新工艺的研究来减少能耗具有一定的现实意义。Imhoff<sup>[13]</sup>比较了完全混合活性污泥法、延时曝气活性污泥法、Carousel氧化沟、纯氧活性污泥法和生物转盘等生物处理系统的总能量需求和运转费用,其中,生物转盘的能耗和费用最低,而延时曝气最高,二者能耗相差约20%。

表2 我国部分污水处理厂不同工艺的规模和能耗

Table 2 Scale and energy consumption of various processes in different sewage plants in China

工艺 Process	企业 Enterprise	规模 Scale $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$	能耗 Energy consumption $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$	平均能耗 Average energy consumption $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$
A <sup>2</sup> /O	杭州市七格污水处理厂	40.00	0.280	0.390
	上海吴淞污水处理厂	3.30	0.320	
	上海龙华污水处理厂	8.30	0.210	
	广州大坦河污水处理厂	14.00	0.490	
	广州惠州惠阳污水厂	6.00	0.240	
	河北某钢铁厂生活污水 处理工程	0.80	0.510	
CASS	山东某污水处理厂D	2.00	0.710	0.240
	广州某住宅小区污水 处理厂	0.20	0.370	
	北京某店污水厂	2.00	0.250	
	上海东区污水处理厂	2.60	0.340	
	北京航天城综合污水 处理工程	1.44	0.140	
SBR	新疆某城市污水处理工程	5.00	0.110	0.270
	昆明第三污水处理厂	20.00	0.300	
	福建某生活污水厂	0.60	0.270	
	上海桃浦污水处理厂	4.80	0.420	
	广州某高级生活小区 污水处理厂	0.40	0.050	
氧化沟 Oxidation ditch	山东某污水处理厂A	2.50	0.320	0.240
	四川某城市污水处理厂	1.00	0.250	
	福建泉州宝洲污水处理厂	15.00	0.220	
	太原北郊污水处理厂	1.40	0.260	
	河南漯河市污水处理厂	8.00	0.250	
	山东潍坊市污水处理	10.00	0.250	
	山东某污水处理厂B	20.00	0.200	
	西安北石桥污水厂	15.00	0.280	
	天津纪庄子污水厂	26.00	0.210	
	传统活性污泥 法 Traditional activated sludge process	上海曹杨污水处理厂	2.00	
	上海曲阳污水处理厂	5.50	0.240	
	上海天山污水处理厂	7.20	0.250	
	北京某会议中心	0.20	0.390	
	总装备部某校污水处理厂	0.17	0.570	
	山东某污水处理厂C	12.00	0.240	
	四川成都三瓦窑污水厂	10.00	0.400	
	浙江绍兴污水处理厂	30.00	0.750	
平均能耗 Average energy consumption // $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$			0.304	

不同区域污水处理的能耗差异主要取决于环境条件、处理工艺和废水性质等,其中处理工艺起着决定性作用。处理工艺的选择涉及城市污水处理的适用技术问题,也决定了污水处理工程实施后的能效。新工艺必须遵循节能、节省投资和处理后水质符合排放与回用标准的基本原则,如SBR法或改进的SBR工艺<sup>[14]</sup>;低溶解氧条件( $0.5 \sim 1.0 \text{ mg}/\text{L}$ )下的活性污泥法<sup>[15]</sup>;采用综合式曝气系统的氧化沟工艺;厌氧处理城市污水的流程<sup>[16]</sup>。另外,由于土地和生态处理技术具备高效低耗的特点,也得到了一定程度的应用<sup>[17]</sup>。

**2.3 污水处理工段能耗比较** 城市污水处理工艺能量密集的过程和操作主要集中于生物处理单元<sup>[18]</sup>,特别是污水提升、曝气系统和污泥处理处置系统,国内外的研究也以这两个领域为主。Acobs<sup>[19]</sup>和Burris<sup>[20]</sup>研究认为,处理设施大部分的能量消耗发生在电机这类单一的设备上,因而节能应从提高全厂功率因数、选择高效机电设备及减少高峰用电等方面入手。而有学者认为,污水处理厂能源的消耗主要是污水和污泥的处理。据此,笔者调查了日本<sup>[21]</sup>、伊朗<sup>[22]</sup>和我国<sup>[12]</sup>典型污水处理方法不同处理阶段的能耗分布。由表3可知,我国的废水处理单位能耗为 $0.266 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,伊朗为 $0.300 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,日本为 $0.455 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。如果将整个过程分为污水提升、污水处理和污泥处理(包括焚烧)3个阶段,我国污水提升能耗占22.55%,污水处理能耗占67.00%,污泥处理能耗占10.45%;日本污水提升能耗占10.08%,污水处理能耗占31.20%,污泥处理能耗占11.40%;伊朗污水提升能耗占92.82%,污泥处理能耗占7.18%。扣除污泥焚烧能耗,日本污水处理能耗低于我国和伊朗。这表明各个国家各工艺阶段的能耗差异较大,根据各工艺阶段能耗进行有针对性的研究,更加有利于减少整个工艺的能耗。

### 3 污水处理工艺节能途径

**3.1 曝气系统** 对曝气系统能耗能效的研究涉及曝气设备的改造和革新,可划分为两类:第1类是采用淹没式的多孔扩散头或空气喷嘴产生空气泡将氧气传递进水溶液的方法,对扩散曝气设备的研究集中于微孔曝气(可产生直径 $2.0 \sim 2.5 \text{ mm}$ 的气泡),具有传氧效率高、可有效节约风量的特点,各国实践都证明微孔曝气器可节电20%以上<sup>[23]</sup>;第2类是采用机械方法搅动污水促使大气中的氧溶于水的方法,罗马利亚学者Ognean<sup>[24-25]</sup>对机械表曝设备研究较为深入,他建立了与理想曝气机和用于生产的实际曝气机相关的氧传输速率、曝气机直径、转速三者的关系。

**3.2 污泥处理系统** 污泥处理系统节能研究主要集中于污泥处理的能量回收。目前有两种回收途径,一种是污泥厌氧消化气的利用,一般城市污水污泥的挥发性组分约占65%(国内一般低于该值),可通过消化稳定约45%,产生的消化气热值约为 $2.26 \times 10^4 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。消化气可通过内燃机或燃料电池转化为机械能或电能,废热还可回收用于消化污泥加热,因此利用消化气能解决污水厂不同程度的能量自给问题<sup>[26]</sup>。在国内沼气发电机组并网发电的研究和应用已有应用实例,是大型污水处理厂消化气综合利用的可行途径<sup>[27]</sup>。

另一种是污泥焚烧热的利用,即把城市固体废物焚烧场建在污水处理厂旁,将固废与污水污泥一起焚烧,获得的电能用于处理厂的运转。Show 等<sup>[28]</sup>按该思路选择了 Montgomery

进行了可行性研究,结果发现,工程地点、环境因素、固体废物量及经济上都具备可行性,且污水厂实现了能量自给。

表 3 我国、日本和伊朗城市污水处理不同工段的能耗

Table 3 Energy consumption of various municipal sewage treatment sections in China, Japan and Iran

项目 Items	设备 Equipment	我国 China		日本 Japan		伊朗 Iran	
		能耗 Energy consumption kW · h/m <sup>3</sup>	比例 Proportion %	能耗 Energy consumption kW · h/m <sup>3</sup>	比例 Proportion %	能耗 Energy consumption kW · h/m <sup>3</sup>	比例 Proportion %
污水提升 sewage Improvement of	主要污水泵	0.060	22.55	0.049	10.08	0.279	92.82
污水处理 Sewage treatment	初沉池	0.178	67.00	0.142	31.20	—	—
	曝气池						
	二沉池						
污泥处理 Sludge treatment	其他						
	消化池	0.028	10.45	0.052	11.40	0.022	7.18
	脱水						
污泥焚烧 Sludge inciner- ation	烟处理其他	—	—	0.212	46.60	—	—
合计 Total		0.266	100	0.455	100	0.300	100

## 参考文献

- [1] 郭小青,林华东,李文龙.传统活性污泥法工艺改进的尝试[J].工业用水与废水,2006,37(1):58-60.
- [2] 国家城市给排水工程技术研究中心.中国城市污水处理现状及规划[J].中国环保产业,2003(1):32-36.
- [3] 涂兆林.我国城市污水处理现状与发展对策[J].市政技术,1997,15(2):29-37.
- [4] 杨宝林.污水处理厂技术概况和发展动向[J].中国给水排水,1991,7(4):28-31.
- [5] 章北平,刘礼祥,陆谢娟,等.城市污水生物生态处理工艺与能效分析[J].中国给水排水,2008,24(5):69-71.
- [6] 高旭,龙腾锐,郭劲松.城市污水处理能耗能效研究进展[J].重庆大学学报(自然科学版),2002,25(6):143-148.
- [7] WPCF. Operation of wastewater treatment plants: A manual of practice 11 [M]. Washington D. C.: Lancaster Press, 1976.
- [8] MCMILLAN H H, RIMKUS R R, NEIL F C. Metro Chicago's study of energy alternatives for wastewater treatment [J]. Journal WPCF, 1981, 52(2):155-161.
- [9] REARDON D J, CULP G L. Energy conservation for treatment facilities [J]. Pollution engineering, 1987(6):42-44.
- [10] RUSHBROOK E L, WILKE D A. Energy conservation and alternative energy sources in wastewater treatment [J]. Journal WPCF, 1980, 52(10):2477-2483.
- [11] EVANS B, LAUGHTON P. Emerging trends in electrical energy usage at Canadian (Ontario) municipal wastewater treatment facilities and strategies for improving energy efficiency [J]. Wat Sci Tech, 1994, 30(4):17-23.
- [12] 羊寿生.城市污水厂的能源消耗[J].给水排水,1984(6):15-19.
- [13] IMHOFF K R. Energy optimization in sewage and sludge treatment [J]. Wat Sci Tech, 1983, 15:103-114.
- [14] MELCER H. Conversion of small municipal wastewater treatment plants to sequencing batch reactors [J]. Journal WPCF, 1987, 59(2):79-85.
- [15] 朱晓君.低氧活性污泥法脱氮除磷工艺生产性研究[J].中国给水排水,1997,13(S1):11-13.
- [16] GENUNG R K, PITT W W, DAVIS G M, et al. Energy conservation and scale-up studies for a wastewater treatment system based on a fixed-film, anaerobic bioreactor [J]. Biotechnology and bioengineering, 1978, 22(2):295-316.
- [17] BATCHELOR A, BOCARRO R, PYBUS P J. Low-cost and low-energy wastewater treatment systems: A South African perspective [J]. Wat Sci Tech, 1991, 24(5):241-246.
- [18] WESNER G M, CULP G L, LINECK T S, et al. Energy conservation in municipal wastewater treatment [R]. Washington DC: Office of Water Program Operations, EPA. Prepared for the U. S. Environmental Protection Agency, EPA 430 / 9-77-011, 1978.
- [19] ACOBS A. Managing energy at water pollution-control facilities [J]. Water & sewage works, 1980, 27(4):28-31.
- [20] BURRIS B E. Energy conservation for existing wastewater treatment plants [J]. Journal WPCF, 1981, 35(5):536-545.
- [21] 吕乃熙.城市污水厂节能技术及其发展主要趋势[J].建筑选刊:中国给水排水,2004,20(5):35-38.
- [22] NOUR J, NADDAFI K, NABIZADEH R, et al. Energy recovery from wastewater treatment plant [J]. Filtration and separation of water, environment and pollution, 2006, 4(1):145-149.
- [23] 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.
- [24] OGNEAN T. A new dimensionless criterion for the oxygen transfer efficiency in both surface and subsurface aeration systems [J]. Wat Sci Tech, 1992, 26(9/10/11):2531-2534.
- [25] OGNEAN T. Relationship between oxygen mass transfer rate and power consumption by vertical shaft aerators [J]. Wat Res, 1997, 31(6):1325-1332.
- [26] DAVIA B. Energy autonomy in the wastewater treatment process [J]. Journal of WPCF, 1980, 52(3):587-596.
- [27] 林文波,李玉庆,聂有壮,等.污水处理厂沼气发电并网运行系统[J].中国给水排水,1999,39(12):39-40.
- [28] SHOW G B, NORTON J W, MIDDLEBROOKS B S. Feasibility of constructing a waste-to-energy incinerator to generate electricity for a collocated wastewater treatment plant [J]. Journal WPCF, 1986, 58(4):267-271.