

文章编号:1000-582X(2002)06-0143-06

城市污水处理能耗能效研究进展*

高旭,龙腾锐,郭劲松

(重庆大学城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

摘要:城市污水处理属于能量密集的综合技术,文章综述了国内外30余年城市污水处理在能耗分析、能源使用的审计与管理以及节能工艺和运行方式的开发等领域的研究进展。文章认为,由于能耗能效研究的理论架构尚未确立,造成分析方法、评价手段滞后于实际应用的发展,因而生物热力学、化工热力学及能源工程学与污水处理领域基础学科的交叉和融合是必然趋势,这一趋势将促使处理工艺能耗能效研究体系化和多样化,并促进各类研究成果的全面整合与推广。

关键词:城市污水处理;能耗能效;研究进展

中图分类号:X52

文献标识码:A

污水处理是能源密集(energy intensity)型的综合技术。一段时期以来,能耗大、运行费用高一定程度上阻碍了我国城市污水处理厂的建设,建成的一些处理厂也因能耗原因处于停产和半停产状态。在今后相当长的一段时期内,能耗问题将成为城市污水处理的瓶颈,开展该领域的研究十分必要^[1]。综述国内外在城市污水处理能源利用方面的进展,是进行该领域系统研究的基础。

1 城市污水处理厂能耗分析

进行现有城市污水处理工艺和单元过程的能量需求(energy requirements)分析不仅是有效运转和管理的需要,也能在污水处理厂的规划、设计阶段体现节能的指导思想。国内在这方面的调查研究很少。羊寿生^[2]曾结合设计经验,对我国典型一级、二级污水处理厂各单元过程作了能耗(电能)估算,估算结果以处理单位体积污水的耗电量表示(kWh/m³),对二级处理厂该值为0.266 kWh/m³,污水厂规模按25 000 m³/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,以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单元过程耗能量要占污水厂直接能耗的60%以上。

西方国家对能源问题的重视有其历史原因。70年代“能源危机(energy crisis)”爆发,导致73年后欧美

等国的能源价格开始快速增长,工业领域的节能研究也随之兴起。

美国对处理厂的能耗调查较为深入,研究的学者也相对较多。Wesner等人^[3]对美国公共污水处理设施所采用的单元过程和单元操作的直接和间接能量需求进行了调查,1982年在最后的技术报告中给出了详细的能量需求分析。他们所调查的单元过程和操作涵盖了当时美国几乎所有的城市污水物理、化学和生化处理方法,甚至包括了附属建筑物取暖制冷的能耗。此外,对厂内能量回收和回用作了详细的理论分析。在他们工作的基础上,E. J. Middlebrooks和C. H. Middlebrooks^[4]将Wesner报告里图表的小设计流量(380~1.9×10⁴ m³/d即0.1~5 mgd)部分转换为最佳拟合线(lines of best fit),并据此计算小系统的能量需求。他们预见,随着能源费用的增长,能耗在所有规模污水处理设施每年的运行费用中所占的比例将越来越大。由于这个倾向,能源费用将成为选择低流量污水厂的处理工艺的主导性因素。

Hagan和Roberts^[5]从分析100 mgd的典型活性污泥污水处理厂总能量需求入手,得出了处理厂能量利用的结构。他们提出了估计处理厂建设的能量需求的方法,同时指出处理厂的能耗问题应在资源管理和综合平衡的背景下研究,而不仅仅是节约的问题。应当特别注意到,他们提出的用于处理厂建设的能量,涉及

* 收稿日期:2002-02-25

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(59838300)及国家自然科学基金资助项目(50178069)

作者简介:高旭(1971-),男,贵州贵阳人,工学硕士,重庆大学博士研究生。主要从事城市污水处理理论和技术的研究。

到能耗更宽泛的外延;后来的学者如 W. F. Owen^[6]在其专著《污水处理能耗与能效》中,对这部分间接能耗进行了阐释,他定义间接能耗是耗费于现场所用原料的生产、建筑施工,结构材料的生产及运输的能源, Owen 所做的工作与 Wesner 等人类似,偏重于对当时所采用的污水二级处理、高级处理、土地处理和污泥处置等工艺的能耗统计和归纳,其结果按污水流量、污染物去除量与比能耗(kWh/m³)的关系制图表示。进行处理系统的优化配置,必须调查不同单元操作或工艺组合的能耗差别, Wesner 和 Burris^{*}、Zarnett^[7]以及 Smith^[8]等人进行了这方面的研究,其成果可以能量为基础对任一组合进行综合评价。而生物和物理-化学处理工艺、以及不同的生物工艺之间能量需求也有很大的不同,其差别甚至高达数十倍^[9-10]。

在欧洲,污水处理能耗研究采用了与美国大致相同的方式。Imhoff^[11]通过大型处理厂的能量结构分析,指出了合理用能的重要性。瑞典学者 Karlsson^[12]在 90 年代提出了一个“耗氧潜势”(Oxygen Consumption Potential, OCP)的概念,OCP 不仅考虑了有机物和氨氮分解的初级氧需求,而且还考虑了由于营养物排放导致藻类生长,这部分藻类在环境中分解的次级氧需求。在此基础上,他比较了斯堪迪纳维亚半岛国家经常采用的化学处理与生物处理工艺去除单位 OCP 的反应器体积、能量需求以及各处理工艺的生态位(Ecopoints),认为化学处理要占优。这一分析方法兼顾了处理工艺本身直接能耗与工艺过程和产物的生态影响,拓宽了能耗分析的范畴。

综合以上研究进展,不难发现以下问题:

1) 能耗研究的边界条件尚不明确。这一问题会导致在进行污水处理厂能量需求比较时产生矛盾的结论,使得评价处理厂的用能水平更为困难。如果仅仅对处理设施或厂进行能耗调查,直接能耗和间接能耗足以反映实际情况。由于各国、各地区间的生产力水平和能源价格水平差别较大,基本没有太多可比性,应注意防止间接能耗的外延超出所研究的边界;如果对地区或包含污水厂的大环境进行资源平衡,能耗问题就不是简单的消耗量问题,应充分考虑所设定评价指标的生态特性和资源利用的综合效益,以避免信息不足导致判断失误。

2) 能耗研究缺乏合理的、统一的评价指标。该问题与前一问题紧密关联。目前经常采用的指标,有以处理水量表示的电耗值,也有去除污染物量表示的能耗,还有当量人口的能耗值。而能耗的单位有 kWh、kJ、Btu 各种形式。这一现象使得各种工艺或处理单元

过程的横向比较变得十分困难。大多数指标是化工行业通用形式的沿用,并未反映污水处理的本质和特点。这一问题一定程度上阻碍了相关交流和该领域的研究进程。

2 污水处理厂节能途径与手段

城市污水处理的能耗分析研究与节能技术和手段的发展往往并不同步。由于污水处理能量平衡分析方法研究的欠缺,节能措施的制订和实施常常超前。而多数节能途径和手段常常由处理厂的操作管理人员结合各处理设施实际情况提出,具有经验性和个别性,不一定能适用于其他污水厂甚至是工艺相似的污水厂;另一方面,从广义上说,污水处理学科领域的技术创新、新材料和新设备的使用都蕴涵着节能增效的潜力,因而节能的途径和手段往往是很宽泛的。下文综述的现状主要集中于节省能耗的专项与相关性较强的研究。

2.1 能源使用的审计与管理

在 WPCF(Water Pollution Control Federation)上世纪 70 年代末所编撰的污水处理厂运行手册^[13]中就提出了当时城市污水处理厂能量节省(Energy Conservation)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定。这些节能措施既包括改善电机的电气性能,也包括解决运转的工艺问题,还包括污水厂产物中的能量回收(Energy Recovery)。Reardon 和 Culp^[14]提出了城市污水处理厂能源审计的主要方法和实施步骤。能源审计管理不仅能为处理厂运转提供可靠的基础数据,而且可指导处理厂工艺方案的选择与节能改造。芝加哥都市卫生区(the Metropolitan Sanitary District of Greater Chicago, MSDGC)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^[15]。Rushbrook^[16]等人通过能耗和费用效益分析比较了延时曝气、生物转盘(好氧消化或厌氧消化)3套 1 800 m³/d 的工艺流程,并为政府的决策提供科学依据。Evans 和 Laughton^[17]对加拿大 Ontario 省主要的污水处理厂能耗状况进行了审计,以便确定具备节能潜力的过程或工序。

同一时期,美国学者 Jacobus^[18]、Burris^[19]认为处理设施大部分的能量消耗是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要求等方面入手。Clough^[20]、

* GEORGE M. WESNER, BURRIS B. E. Energy comparisons in wastewater treatment. Paper presented at the 51st Annual Conference of the Water Pollution Control Federation Anaheim, Calif., 1978.

Healey^[21]、Vik、Lamers 和 Baudhuin^[22] 以及李亚峰^[23] 等对此也有类似看法。

Heggen 和 Williamson^[24] 两人将能源利用分析扩展到流域的水污染控制项目中,通过计算流域大系统各污染控制措施输入输出的能量和直接能量消耗,帮助确定污染控制的最优方案。不过水污染控制方案的能量消耗是以方案的实物产出(美元)乘以转换系数得到的,结果也只是作为经济分析的参照,还不是一种系统的能耗研究。

Prindle 等人^[25] 提出高效的能源管理不但应针对特定的单元过程而且应将处理厂作为一个整体来考虑能源费用要素。他们提出减少能量费用的两类策略:节约和负荷管理(load management)。负荷管理方法可跟踪节能方案的实际效果,实现手段相对容易,易于推广。而进行污水处理厂的“概念设计”(conceptual design),就几种节能方案进行生命周期的费用效益分析,可为设计提供可靠的指导^[26]。国外甚至还在寒冷地区的污水厂结合建筑节能和工程节能进行综合设计,它涉及到处理厂布局、构建筑物材料、太阳能利用等诸多方面的节能措施的实践,大大超越了工艺改进的范围^[27]。

2.2 提高能效的技术手段

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,特别是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。

1) 曝气系统。对曝气系统能耗能效的研究总是涉及到曝气设备的改造和革新。新型的曝气设备虽然层出不穷,但目前仍然可划分为2类:第1种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,第2种是采用机械方法搅动污水促使大气中的氧溶于水的方法。对扩散曝气设备的研究集中于微孔曝气(可产生直径2.0~2.5 mm的气泡),因其具有传氧效率高、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^[28-29]。EPA^[30]在80年代曾对影响微孔曝气设备测定和效率的各种相关因素进行了调查和验证,评价了微孔曝气设备的节能潜力,讨论了其发展状态,提出了提高其运行效率的一些措施。Chambers 和 Jones^[31]等人研究了微孔曝气的节能途径。他们的研究包括氧需求计算、纵向混合的数学表达、氧平衡的动力学方程的推导和应用、DO控制系统的设计等等,其目的是将设计模型推导的结果运用于曝气扩散头的布局和曝气系统的调节,据称,改造后的硝化处理效率提高了50%。Wagner 和 Pöpel^[32]认为微孔曝气的清水传氧效率主要影响因

素为空气流量、曝气头淹没深度和曝气头密度。而气流流量与氧传递的关系已了解得比较透彻,故他们的研究侧重于后两个因素对体积传氧速率($\text{gO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{h}$)、比氧吸收率($\text{gO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{m}$)和曝气效率(kgO_2/kWh)的影响。

大量的研究^[33]都证明微孔曝气能达到有效混合与氧气的充分扩散,但是扩散头存在易于堵塞、难于清洗的缺点。而表面曝气设备则不存在这些问题。罗马利亚学者 Ognean^[34-35]对机械曝气设备研究较为深入,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。学术界对扩散曝气和表面曝气孰优孰劣的争论几十年来一直没有停止过,Frey^[36]实测了数种曝气设备在实际条件下的运行效果,这些设备包括射流曝气器、微孔曝气头和倒锥形表曝机,结果发现由于受到池型、曝气头布局及其本身的故障影响,微孔曝气头的优势并未体现出来,其效率与机械曝气相当。

对于以上提到的研究中出现的矛盾现象,根源还在于清水试验条件与池型、水质及运转方式等实际条件的差别。为克服微孔曝气设备的缺陷,Thomas^[37]等人提出采用机械曝气与微孔曝气组合的混合(hybrid)曝气方式。经计算机模拟以及投资和运转费用比较表明,混合曝气系统能效比单纯采用表曝和微孔曝气都要高,且具有最低的净现值。而法国 Déronzier 等人^[38]采用了曝气与混合分离的方式来优化氧传递。

改变曝气系统的运行方式,可达到节能的效果,同时还可增加生物处理系统的功能。日本的 Tanaka 等人^[39]在传统活性污泥处理厂试验了曝气池中辟出前端厌氧区,用淹没式搅拌器混合的节能、生物除磷方案。这一简单的改造节省了近20%的曝气能耗,如果算上混合用能,节能也达到了12%;而且获得了稳定、高效的磷去除。Ip 等人^[40]提出的是连续进出水、间歇曝气的方案,不仅可节省30%的曝气能耗,而且减少了15%的剩余污泥。Copp 与 Dold^[41]通过32个批次试验证实了缺(厌)氧条件下污泥的产率为好氧条件的62%,并根据COD平衡作了相应的理论解释。实际上,Neiva 等人^[42]有意地中断曝气以避免用电高峰,并未发现对活性污泥和出水水质有任何显著的影响,这些研究为曝气和生物处理系统节能提供了一个可行的切入点。

自动控制系统的應用为污水处理节能开辟了新的思路。例如 Olsson 等人^[43]最早开展了曝气池DO控制的研究,这也是控制供氧量最直接的办法^[44]。而 Charpentier 等^[45-46]对氧化还原电位ORP(oxidation

reduction potential)控制的研究较多,他们认为 ORP 控制比 DO 控制精确且容易实现,在法国数座污水处理厂的生产性试验表明 ORP 控制可优化能量利用,特别是能提高碳源、氮源污染物的去除效率。此外,采用模糊逻辑控制策略精确控制曝气池内的氧浓度也有较为显著的节能效果^[47]。

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。从污水污泥有机污染物中回收能量用于处理过程早在上世纪初就已投入实践,但能源危机之前一直不受重视。目前有两种回收途径:一是污泥厌氧消化气利用,一是污泥焚烧热的利用。

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 2.26×10^4 kJ/kg。消化气性质稳定、易于贮存,它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^[48]。道见芳郎^[49]、奥藤武^[50]对消化气体发电原理和应用作了详细阐述,对诸多发电设备也作了比较。值得一提的是 70 年代中期出现的燃料电池(曾用于阿波罗空间计划),该技术在污水处理领域的应用较新,国外已有实例^[51]。林荣忱等人^[52]比较了沼气发电机和燃料电池两种利用形式,认为燃料电池能量利用率高,具有很好的发展前途。

对消化气的最大化利用是提高能效的主要方式。Turnipseed^[53]、Baumann^[54]等对这种应用方式进行了讨论,并分析了所需注意的诸多工程问题。国内对污泥处理节能研究得较多是林荣忱等人^[55-56],他们对污泥处理构筑物的固体回收率的探讨,有助于提供新的研究视角;沼气发电机组并网发电的研究和应用^[57]在国内已有应用实例,是大型污水处理厂的沼气综合利用的可行途径。

另外一种能量回收方式是将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。Shaw、Norton 和 Middlebrooks^[58]按此思路选择了 Montgomery 郡进行了可行性研究,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,而且污水厂实现了能量自给。Treweek^[59]对此也有类似研究。

2.3 节能新工艺的应用

处理工艺的比选涉及到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、节省投资和使处理后水质符合排放与

回用要求的基本技术路线。世界各国都在致力于低投资、低能耗的新技术新工艺的研究。例如,SBR 法或改进的 SBR 工艺^[60-61];低溶解氧条件(0.5~1.0 mg/L)下的活性污泥法^[62];采用综合式曝气系统的氧化沟工艺^[63];厌氧处理城市污水的流程^[64-69]。另外,土地和生态处理技术由于具备高效低耗的特点,得到了一定程度的应用^[70-72]。

3 节能研究主要发展趋势

综观国内外研究现状,节能研究的发展趋势以及该领域还需要进一步深入的工作可以归纳如下:生物热力学、化工热力学及能源工程学与污水处理领域基础学科的交叉和融合是必然趋势,只有建立完善的研究体系和理论,才可从根本上解决水处理能量研究滞后于实践活动的矛盾,并获得可靠、科学的处理工艺能耗能效的分析评价方法,促进各类研究成果的全面整合与推广。

参考文献:

- [1] 高旭. 合建式完全混合活性污泥工艺的节能技术研究[D]. 重庆:重庆建筑大学城市建设学院,1999.
- [2] 羊寿生. 城市污水厂的能源消耗[J]. 给水排水,1984,(6):15-19.
- [3] WESNER G M, CULP G L, LINECK T S, et al. Energy conservation in municipal wastewater treatment[R]. Washington D C: Office of Water Program Operations, EPA. Prepared for the U.S. Environmental Protection Agency, EPA 430/9-77-011,1978.
- [4] MIDDLEBROOKS E J, MIDDLEBROOKS C H, REED S C. Energy requirement for small wastewater treatment system[J]. Journal WPCF, 1981,53(7):1172-1197.
- [5] HAGAN R M, ROBERTS E B. Energy Requirements for Wastewater Treatment (Part 2)[J]. Water & Sewage Works,1976,(11):52-57.
- [6] OWEN W F. Energy in wastewater treatment[M]. Englewood Cliffs N J: Prentice hall, Inc,1982.
- [7] ZARNETT G D. Energy requirements for wastewater treatment equipment[R]. Applied Science Section, Pollution Control Branch, Ministry of the Environment, Ontario, Can., TN7008, 1976.
- [8] SMITH R. Electric power consumption for wastewater treatment[R]. Cincinnati, Ohio: U. S. Environmental Protection Agency, EPA R2-73-281,1973.
- [9] GARBER W F. Energy - wastewater treatment and solids disposal[J]. J. Env Eng Div, A S C E, 1975, EE3:319-325.
- [10] JACOBS A. Reduction and recovery: keys to energy self-sufficiency[J]. Water & Sewage Works, 1977, Ref:24-37.
- [11] IMHOFF K R. Energy optimization in sewage and sludge treatment[J]. Wat. Sci. Tech., 1983,15(Capetown): 103-114.
- [12] KARLSSON I. Environmental and energy efficiency of different sewage treatment processes[J]. Wat. Sci. Tech., 1996,34(3

- 4): 203 - 211.
- [13] W P C F. Operation of Wastewater Treatment Plants - Manual of Practice No. 11 [M]. Washington D. C. : Lancaster Press, 1976.
- [14] REARDON D J, Gordon L Culp. Energy conservation for treatment facilities[J]. Pollution Engineering, 1987, (6): 42 - 44 and (7): 82 - 84.
- [15] 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.
- [16] RUSHBROOK E L, WILKE D A. Energy conservation and alternative energy sources in wastewater treatment[J]. Journal WPCF, 1980, 52(10): 2 477 - 2 483.
- [17] 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.
- [18] JACOBS A. Managing Energy at Water Pollution - Control Facilities [J]. Water & Sewage Works, 1980, (4): 28 - 31.
- [19] BURRIS B E. Energy conservation for existing wastewater treatment plants[J]. Journal WPCF, 1981, 53(5): 536 - 545.
- [20] CLOUGH G F G. Practical aspects of energy saving in wastewater disposal[J]. Wat. Pollut. Control, 1983, 82(4): 510 - 517.
- [21] HEALEY M J. Improvements in the activated sludge process in the U. K. and U. S. [J]. Journal WPCF, 1989, 61(4): 446 - 451.
- [22] VIK T E, LAMERS D J, BAUDHUIN W. Energy Practices help make a winner[J]. WATER/Engineering & Management, 1984, (8): 27 - 29, 40.
- [23] 李亚峰, 马学文. 浅谈城市污水处理厂的节能[J]. 节能, 1998, (1): 35 - 37.
- [24] HEGGEN R J, WILLIAMSON K J. Energy analysis of regional water pollution control[J]. Journal WPCF, 1979, 51(4): 759 - 771.
- [25] PRINDLE W M, BUELL D A, SCULLY L J. A management approach to energy cost control in wastewater utilities [J]. Journal WPCF, 1983, 55(10): 1 239 - 1 243.
- [26] REID C P, MILLS D. Designing an energy efficient wastewater treatment plant[J]. Water & Sewage Works, 1979, (11): 60 - 62 and (12): 27 - 28 and 1980, (1): 40 - 44.
- [27] WILKE D A, HEAD G. Wastewater plant design reduce off-site energy needs[J]. Water & Sewage Works, 1976, (1): 41 - 43.
- [28] 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.
- [29] 吕乃熙. 城市污水厂节能技术及其发展主要趋向[J]. 建筑选刊: 给水排水, 1990, (1): 17 - 23.
- [30] MCCARTY J J. Technology Assessment of Fine Bubble Aerators[R]. Cincinnati, Ohio: Wastewater Research Division, U. S. EPA Municipal Environmental Research Laboratory, EPA - 600/2 - 82 - 003, 1982.
- [31] CHAMBERS B, JONES G L. Energy saving by fine - bubble aeration[J]. Wat. Pollut. Control, 1985, 84: 70 - 86.
- [32] WAGNER M R, PöPEL H J. Oxygen transfer and aeration efficiency - influence of diffuser submergence, diffuser density, and blower type[J]. Wat. Sci. Tech., 1998, 38(3): 1 - 6.
- [33] BACON V W, BALMER R T, GRISKE R G. Oxygen transfer tests prove efficiency of fine bubble diffuser [J]. Water & Sewage Works, 1977(9): 122 - 124.
- [34] 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 - 11): 2 531 - 2 534.
- [35] OGNEAN T. Relationship between oxygen mass transfer rate and power consumption by vertical shaft aerators[J]. Wat. Res., 1997, 31(6): 1 325 - 1 332.
- [36] FREY W. Comparison of aeration equipment under operating conditions[J]. Wat. Sci. Tech., 1991, 24(7): 43 - 45.
- [37] THOMAS V K, CHAMBERS B, DUNN W. Optimisation of aeration efficiency: a design procedure for secondary treatment using a hybrid aeration system[J]. Wat. Sci. Tech, 1989, 21 (Brighton): 1 403 - 1 419.
- [38] DeRONZIER G, HéDUIT A. Optimization of oxygen transfer in clean water by fine bubble diffused air system and separate mixing in aeration ditches[J]. Wat. Sci. Tech, 1998, 38(3): 35 - 42.
- [39] TANAKA T, KITAGAWA M, OHKUBO E. Energy saving, high biological phosphorus removal and improvement of sludge settleability on full - scale anaerobic - aerobic activated sludge process[J]. Wat. Sci. Tech., 1991, 23(Kyoto): 801 - 810.
- [40] IP S Y, BRIDGER J S, MILLS F. Effect of Alternating Aerobic and Anaerobic Conditions on the Economics of the Activated Sludge System[J]. Wat. Sci. Tech, 1987, 19: 911 - 918.
- [41] COPP J B, DOLD P L. Comparing sludge production under aerobic and anoxic conditions[J]. Wat. Sci. Tech., 1998, 38 (1): 285 - 294.
- [42] NEIVA M R, GALDINO L A, CATUNDA P F C, et al. Reduction of Operation Costs by Planned Interruption of Aeration in Activated Sludge Plants [J]. Wat. Sci. Tech., 1996, 33(3): 17 - 27.
- [43] OLSSON G, ANDREWS J F. Dissolved oxygen control in the activated sludge process[J]. Wat. Sci. Tech., 1981, 13(10): 341 - 347.
- [44] 王显, 吕庆兴. 曝气池溶解氧浓度控制与节能[J]. 给水排水, 1996, 22(12): 22 - 24.
- [45] CHARPENTIER J, FLORENTZ M, DAVID G. Oxidation - reduction potential (ORP) regulation: a way to optimize pollution removal and energy savings in the low load activated sludge process[J]. Wat. Sci. Tech., 1987, 19(Rio): 645 - 655.
- [46] CHARPENTIER J, GODART H, MARTIN G, et al. Oxidation - reduction potential (ORP) regulation as a way to optimize aeration and C, N and P removal: experimental basis and various full - scale examples[J]. Wat. Sci. Tech., 1989, 21(Brighton): 1 209 - 1 223.
- [47] FERRER J, RODRIGO M A, SECO A, et al. Energy saving in the aeration process by fuzzy logic control[J]. Wat. Sci. Technol., 1998, 38(3): 209 - 217.
- [48] DAVIA B. Energy autonomy in the wastewater treatment process [J]. Journal of WPCF, 1980, 52(3): 587 - 596.
- [49] 道见芳郎著. 消化气体发电的原理和运用[J]. 蔡千华译. 新能源, 1989, 11(5): 10 - 14.

- [50] 奥藤武著. 下水污泥的高效消化气体发电系统[J]. 宋平译. 新能源, 1989, 11(5): 10-14.
- [51] TROCCIOLO J C, HEALY H C. Demonstration of Fuel Cells to Recover Energy from Anaerobic Digester Gas: Phase I. Conceptual Design, Preliminary Cost, and Evaluation Study[R]. Cincinnati, Ohio: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Environmental Engineering and Technology Demonstration, EPA-600/sr-95-034, 1995.
- [52] 林荣忱, 周伟丽, 林文波等. 城市污水处理厂沼气发电的两种方式[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(3): 57-59.
- [53] TURNIPSEED C B, RIVINUS R P, BROWN J. Minimizing sludge handling and energy requirements for advanced wastewater treatment[J]. Journal WPCF, 1980, 52(2): 364-371.
- [54] BAUMANN P G. Digester methane utilization can be optimized[J]. Water & Sewage Works, 1980, (11): 44-46, 68.
- [55] 林荣忱, 钟志鹏, 林文波. 污水处理厂消化池节能给污泥处理设施固体回收率[J]. 城市环境与城市生态, 1998, 11(4): 1-4.
- [56] 林荣忱, 钟志鹏, 林文波. 城市污水处理厂污泥处理设施节能[J]. 污染防治技术, 1998, 11(4): 218-221.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] TREWEEK G P. Refuse-to-energy wastewater treatment[J]. Journal of the Energy Division, 1981, 107(EY1): 1-16.
- [60] 王凯军, 贾立敏. 城市污水生物处理新技术开发与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [61] MELCER H. Conversion of Small Municipal Wastewater Treatment Plants to Sequencing Batch Reactors[J]. Journal WPCF, 1987, 59(2): 79-85.
- [62] 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, 增刊: 11-13.
- [63] 刘保疆. 侧沟式一体化氧化沟间歇曝气工艺脱氮性能研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学城建学院, 1998.
- [64] GENUNG R K, PITT W W, DAVIS C 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 Symp., 1980, (10): 295-316.
- [65] GENUNG R K, HANCHER C W, RIVERA A L, et al. Energy conservation and methane production in municipal wastewater treatment using fixed-film, anaerobic bioreactors[J]. Biotechnology and Bioengineering Symp., 1982(12): 365-380.
- [66] INCE O. Potential energy production from anaerobic digestion of dairy wastewater[J]. J. Environ. Sci. Health, 1998, 33(6): 1219-1228.
- [67] 龙腾锐, 何强, 陈士年. 变速厌氧生物滤池处理城市污水研究[J]. 中国给水排水, 1995, 11(2): 4-8.
- [68] 周琪, 袁嗣兵, 竺建荣等. 升流式厌氧污泥床处理生活污水[J]. 中国给水排水, 1992, 8(4): 45-57.
- [69] 王凯军. 厌氧工艺的发展和新型厌氧反应器[J]. 环境科学, 1998, 19(1): 94-96.
- [70] 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.
- [71] SCHWEGLER B R, MCKIM T W. Energy efficient wastewater treatment system[J]. Biotechnology and Bioengineering Symp. 1983, (13): 385-399.
- [72] WANG B. Ecological waste treatment and utilization systems on low-cost, energy-saving/generating and resources recoverable technology for water pollution control in China[J]. Wat. Sci. Tech., 1991, 24(5): 9-19.

Research Advances on Energy Consumption and Energy Efficiency in Municipal Wastewater Treatment Process

GAO Xu, LONG Teng-rui, GUO Jin-song

(Institute of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Municipal wastewater treatment process could be attributed to energy-intensity integrated technology. Research advance is summarized across from energy consumption analysis, energy audit and management to development on energy saving processes or performance modes. The author think that due to theory frame of energy consumption and energy efficiency not being established, analytical approaches and evaluation means lag behind practical application. So consequent trend of intercrossing and syncrizing between biothermodynamics, chemical thermodynamics, energy engineering and basic knowledge in wastewater treatment domain would emerge. The trend will promote systematism and diversification occur in study on processes energy consumption and energy efficiency, and promote all kinds of research productions to be integrated and popularized.

Key words: municipal wastewater treatment; energy consumption; energy efficiency; research advance

(责任编辑 姚飞)