

污水生物处理单元^①平衡分析方法研究()

高旭, 郭劲松, 龙腾锐 (重庆大学城市建设与环境工程学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:按照^②平衡分析模型对某城市污水处理厂的二级处理系统进行了研究, 结合^③效率指标考察了其能量质的变化和损耗. 通过这种分析, 可以从根本上明确^④损耗发生的位置和途径. 文章认为, 应致力于降低不必要的、过大的推动力或改变运行方式以减少外部^⑤损失. 该研究的结论可用于指导污水处理厂进行系统的节能工作.

关键词: 污水生物处理; ^⑥平衡; ^⑦效率; 节能

Study on exergy balance analyzing approach for biological wastewater treatment unit()

GAO Xu, GUO Jinsong, LONG Tengrui (Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045)

Abstract: According to the exergy balancing model, the secondary biological treatment system of a wastewater treatment plant had been studied. Qualitative change of energy was examined with exergy efficient indexes. By means of such analysis, where and how exergy loss happens would be certainly ultimately. The analysis indicated that superfluous or unnecessary impetus should be prevented, and the operation mode also should be altered to reduce exergy loss. The conclusion the study suggested would be used to the systematic energy conservation in the wastewater treatment plants.

Key words: wastewater biological treatment; exergy balance; exergy efficiency; energy conservation

本文拟采用文献[1]中提出的^⑧平衡分析模型对国内某城市污水处理厂的生物处理单元进行^⑨平衡和评价分析. 评价目的在于研究这种方法的适用性, 寻求可以表达能的质变化和损耗的技术指标, 以便有针对性地提出处理工艺的节能措施.

1 分析的前提和假设

在以下讨论中, 研究体系为二级处理部分所涉及的单元操作和单元过程, 包括曝气池和二沉池系统、混合液回流和污泥回流系统、剩余污泥排放单元以及鼓风曝气的供氧系统; 其边界为各设施的物理边界, 曝气池、沉淀池液面以及鼓风机进气口也视为虚边界.

1.1 污水和污泥污染物的化学^⑩

污水中污染物的化学^⑪采用较易测定的 COD_G 指标换算, 按文献[2], 即 $13.825 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$. 污泥中微生物细胞所包含的能量, 采用污泥中挥发性悬浮固体(VSS)的含量计算, 即 $22.605 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ [2]. 清水的^⑫量和污水的热量^⑬不考虑.

按照文献[1]提出的^⑭平衡模型, 进水污染物化学^⑮被利用的部分 $E_{x, \text{代谢}}$ 又可分为 $E_{x, \text{生物合成}}$ 、 $E_{x, \text{维持}}$ 、 $E_{x, \text{溢漏}}$ 3 部分, $E_{x, \text{生物合成}}$ 用有机物分解和称为生物体通式^[3]估算, $E_{x, \text{维持}}$ 和

收稿日期: 2003-08-28; 修订日期: 2004-06-05

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

作者简介: 高旭(1971—), 男, 讲师(博士), hughgao@21cn.com, 02365120768

$E_{x, \text{溢}}$ 则难以测定,但两者之和可由 $\dot{E}$ 平衡得出。 $E_{x, \text{维持}}$ 和 $E_{x, \text{溢}}$ 的增加将降低微生物用于生物合成的能的总量,这有利于减少剩余污泥量。

1.2 扩散 $\dot{E}$

输入空气(O_2 、 N_2 、 CO_2 等)的扩散 $\dot{E}$ 与污水污染物的化学 $\dot{E}$ 相比很小,不到 2%,故忽略不计。

1.3 环境条件

为方便比较并与标准化学 $\dot{E}$ 的定义衔接, $\dot{E}$ 分析研究所涉及的标准状态均指水温 25 (298.15 K),气压 1.013×10^5 Pa。在该标准条件下的空气组成按常规考虑。

1.4 曝气系统的 $\dot{E}$ 输入

以电能形式输入曝气系统的 $\dot{E}$ 量通过两种途径发生 $\dot{E}$ 损失:一是因曝气设备传质能力的限制或设备设计不完善所导致的 $\dot{E}$ 损失。一般活性污泥法典型的动力效率范围为 $0.40 \sim 2.40 \text{ kg} \cdot (\text{kWh})^{-1}$,这一数值还受到所采用工艺、曝气池池型、混合液浓度、污水性质和气候等等条件的影响,但主要影响因素还在于设备的固有设计^[4]。一般设备生产厂家提供的都是 20 、 1.013×10^5 Pa 下清水试验的动力效率数据,故需结合现场测量来确定该值。但动力效率数值不能给出能和 $\dot{E}$ 利用率的大小,因设备输出的能量一项难以计量,特别是机械曝气装置输出能量的形式包括液体被卷吸得到的动能、搅拌产生的热能、曝气设备后侧因转动形成负压产生空气的压能等等,欲一一测定各类形式的能和 $\dot{E}$,目前的手段难以实现。因而对机械曝气装置本身的 $\dot{E}$ 损失一项可视为其内部损失,其大小由设备的选型和安装运转的条件决定;二是因供氧量和需氧量不匹配造成供氧过量而散逸的 $\dot{E}$,这部分多余的 $\dot{E}$ 量未用于微生物,将以风管和扩散装置的摩擦损失、混合的热 $\dot{E}$ 、排向大气的物理 $\dot{E}$ 等形式损失。实际被微生物利用的氧气量可通过进出水污染物浓度计算。曝气设备在实际动力效率条件下供给氧气量的多余部分视为损失,与之相对应的 $\dot{E}$ 损失为外部损失。

基于以上分析,需要知道处理厂实际的需氧量和曝气设备的供氧能力。供氧能力可结合设计参数和实测取值,需氧量应包括有机物降解的需氧量——碳化需氧量和硝化需氧量两部分,并应考虑细胞合成所需的氨氮和排放剩余污泥所相当的 BOD_5 值,同时还应考虑反硝化过程中放出的氧量与消耗相应量的有机物作反硝化菌的碳源所相当的 BOD_5 值。

2 污水生物处理单元 $\dot{E}$ 平衡分析

本文所研究的污水处理厂处理水量约 $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,出水按 $COD_{Cr} \leq 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $BOD_5 \leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $SS \leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 控制,采用 AB 工艺,其中 B 段又可以根据水质情况按 A^2/O 方式运行。曝气设备为 NOPOL 微孔曝气头,供氧采用 4 台电动鼓风机和 1 台沼气鼓风机,单台风量为 $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。剩余污泥由中间沉淀池和最终沉淀池排出,经预浓缩后进消化池。消化后污泥浓缩后压滤脱水。目前消化池按常温运行,所产沼气用于带动沼气鼓风机和厂区民用。

进出水: A^2/O 段进水 COD_{Cr} 平均为 $103.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。终沉池出水月平均为 $26.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

剩余污泥: A^2/O 段在采用 $A + A^2/O$ 工艺运行时,夏季典型月实测值为 $1234 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$,污泥中 VSS 含量为 70%。

曝气系统 $\dot{E}$ 输入和输出:鼓风曝气系统的 $\dot{E}$ 损失以两种形式发生,一是因供给的氧量高于污染物降解所需的氧量使多余的空气散失而造成;一是鼓风机和管道系统的水力、容积和机械

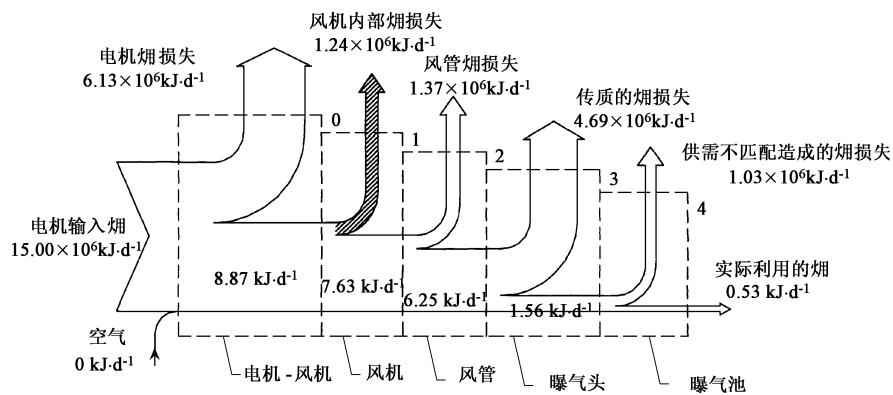


图2 处理厂曝气系统 E 流图

Fig. 2 Exergy flow diagram of the aeration system in the plant

不匹配以及污水中氧传递阻力增大造成的,前者可以通过溶解氧或氧吸收速率的实时监控来供给相当的氧气量以避免过量 E 的排放;后者可通过改善传质条件,如设法提高液膜的饱和溶解氧值、增大与液相主体溶解氧的浓度差等措施来实现.就该处理厂而言,各项 E 损失的总和占到了总输入 E 的96.48%,实际利用部分不到5%,曝气系统的节能(E)还有较大潜力.

其它 E 输入和输出:对于水泵类设备,在液体温度无变化时,泵转移给液体的物理 E 与其出口的相对压强有关,其内部 E 损失为零.故泵的 E 损失由其效率决定,可由电机输入功率与泵的有效功率差值计算;泵系统管路沿程和局部损失由于缺乏实测数据,按扬程的10%考虑.

该处理厂二级处理部分的 E 平衡分析见表2.

表2 处理厂二级处理部分(A^2/O 段) E 平衡表

Table 2 Exergy balance for secondary treatment section (A^2/O section) of the plant

项目	输入 $\text{E}/(\text{kJ} \cdot \text{d}^{-1})$	占输入总 E 的百分比	输出 $\text{E}/(\text{kJ} \cdot \text{d}^{-1})$	占输出总 E 的百分比
进水	66.84 $\times 10^6$	75.97 %		
进水中用于生物合成部分的化学 E			41.54 $\times 10^6$	47.22 %
进水中用于维持部分和溢流的化学 E			8.46 $\times 10^6$	9.62 %
出水			16.83 $\times 10^6$	19.13 %
剩余污泥 ¹⁾			19.53 $\times 10^6$	22.20 %
曝气系统(其中:回收利用部分)	15.00 $\times 10^6$ (8.94 $\times 10^6$)	17.05 % (10.16 %)		
曝气系统实际利用的 E			0.53 $\times 10^6$	0.60 %
曝气系统内部 E 损失			1.24 $\times 10^6$	1.41 %
曝气系统外部 E 损失			13.23 $\times 10^6$	15.03 %
其它 E	6.14 $\times 10^6$	6.98 %		
其它 E 输入中实际利用部分			3.83 $\times 10^6$	4.35 %
其它 E 输入的 E 损失			2.31 $\times 10^6$	2.63 %
合计	87.97 $\times 10^6$	100 %	87.97 $\times 10^6$	100 %

1) 用于生物合成的化学 E 包含转移到剩余污泥中的化学 E .

3 污水处理厂 E 流图分析

按照 E 平衡分析的结果把进出二级处理系统各项 E 量的百分数,按比例绘于一张 E 量流向的平面图上,可得到 E 流图(图3).在 E 流图中,处理厂输入输出二级处理单元的 E 量按同等比例绘制,箭头宽度代表 E 值.

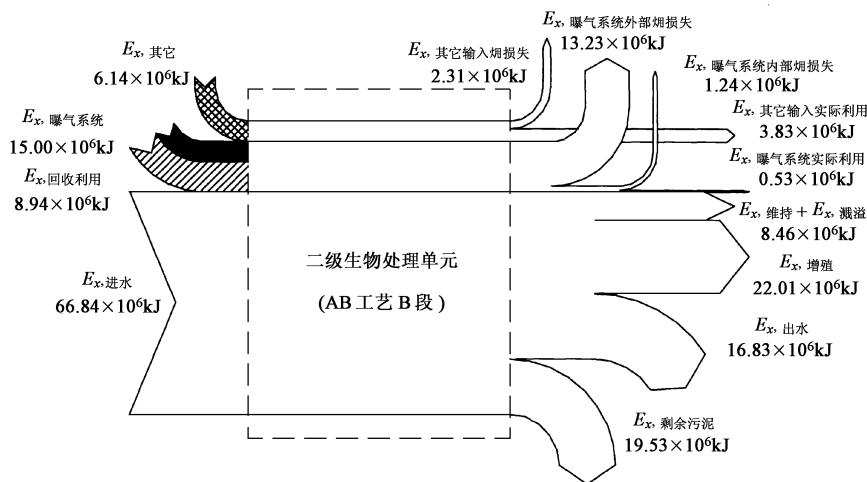
图3 处理厂 Ex 流图

Fig. 3 Exergy flow diagram of the plant

3.1 供需不匹配造成的 Ex 损失较大

曝气系统中电机、风机 Ex 损失,风管 Ex 损失以及传质 Ex 损失,一般在设备选型安装后就不能改变,因此真正可变部分是在氧的供给阶段,在这一阶段该厂约有66%的输入 Ex 发生了损失(参见图2虚线框4)。微生物系统所需氧气量与进水浓度、微生物好氧速率、运行方式等相关,目前防止过量曝气的手段通常为曝气池DO浓度控制。该厂虽装备了这种控制系统,但从 Ex 分析结果可以知道,这类控制方式并未充分发挥其功能。排除设备故障、控制信号滞后等原因,DO控制只能保持池中溶解氧浓度不成为污染物降解的限制因素^[5]。但问题的关键在于微生物利用氧气的速率,即微生物的比耗氧速率决定了需氧量的多少。对于曝气池内DO浓度维持在多少为宜,这个问题仍在探讨中,目前认为 2 mg L^{-1} 的水平应当是最低要求。看来要保持曝气池供氧与需氧实时的吻合,以减少无谓的损耗,还必须优化控制方案、提高控制手段的精密性。

3.2 曝气系统的 Ex 损失以外部的 Ex 损失为主

由该厂的 Ex 流图可以知道,曝气系统 Ex 损失占其 Ex 输入的80%以上,在总的 Ex 输入中也占到了7%~15%。电机-风机以及曝气头部分的 Ex 损失最大,说明节能的关键仍然是提高电机和鼓风机及传质的效率。高效电机目前在国内污水厂中使用并不普遍,主要原因在于其价格一般比标准电机贵15%~25%,但其效率一般比标准电机高2.5%~8.6%(75 kW~0.75 kW),而且其运转时温度低、绝缘寿命长;功率因数对线路电压和电机负荷的敏感性低。在改扩建和新建污水厂的项目中,应对使用高效电机及高效变频驱动的可行性给予充分的技术经济评估。

泵或风机是电机驱动的机械负荷,但其效率比电机低,一般在50%~90%的范围内。因而提高风机的效率更为重要。但是风机效率与其固有设计有关,因此必须在设计选型阶段就力求采用高效率的鼓风机组。

在风管、曝气头处发生的压力降通常不能避免,但通过保持空气过滤装置及曝气头的清洁,可以降低压头的损失。这些部位结垢和堵塞甚至最多可导致20%的压头损失。曝气头 Ex 损失除了与其传质方式有关外,还受到污水水质、设备完好程度的影响。防止曝气头堵塞也是提

高其微孔曝气系统传质效率的重要方面. 本文研究的处理厂 B 段曝气池可看到较大的气泡上浮, 说明池底曝气头已发生了堵塞.

3.3 作为工艺辅助而输入的 $\dot{E}$ 量损失

这部分 $\dot{E}$ 输入包括混合、回流、剩余污泥排放、沉淀池刮吸泥等过程输入的电能. 混合所需的动能与污泥颗粒的大小和曝气池的几何形状有关. 为保持污泥呈悬浮状态并与底物和氧气充分接触, 一般认为曝气池混合液的速度至少应为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 不同的曝气系统呈现不同的混合特点. 美国 W. E. F. (Water Environment Federation) 出版的设计手册推荐鼓风机曝气系统采用 $0.61 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 但是他们也发现洛杉矶某厂在 MLSS 为 $1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时采用 $0.25 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的混合强度运行并未发生污泥沉积在曝气头底部的现象^[6]. 本文所研究的处理厂该值为 $0.997 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 大大高于 W. E. F. 的推荐值, 说明该厂供给氧气过量较多, 并与 $\dot{E}$ 分析的结论吻合. 回流与剩余污泥排放过程 $\dot{E}$ 损失主要发生在电机和管路系统上. 所研究的厂位于我国北方平原地区, 其污泥、混合液回流以及剩余污泥排放都由泵来完成, 因而降低 $\dot{E}$ 损失的主要途径仍然在于改善电机性能、优化系统设计.

4 $\dot{E}$ 平衡指标

由于普遍 $\dot{E}$ 效率不能体现污水处理工艺的热力学特点, 故采用目的 $\dot{E}$ 效率对该厂二级处理系统的 $\dot{E}$ 利用状况进行评价. 工艺辅助部分输入的 $\dot{E}$ 作为过程的推动力计入文献[1]式(7)分母的 E_{x, O_2} 中, 则该厂的目的 $\dot{E}$ 效率为 59.05%. 目的 $\dot{E}$ 效率反映的是系统所获得收益与所付出代价的比值, 它体现了处理设施 $\dot{E}$ 量利用的热力学完善程度. 因为 $\dot{E}$ 是可自由转化的能量, 故节能的主要目的在于节 $\dot{E}$, 减少过程和设备的 $\dot{E}$ 损失. 从 $\dot{E}$ 效率看, 该厂还有很大的节能潜力, 应致力于降低不必要的、过大的推动力或改变运行方式以减少 $\dot{E}$ 损失.

5 结论

本文按照 $\dot{E}$ 平衡分析模型对某处理厂的二级处理系统进行了实例研究, 结果表明: 该厂曝气系统节能($\dot{E}$)的主要环节是匹配氧气的供给与需求, 应致力于降低不必要的、过大的生化反应推动力或改变运行方式以减少 $\dot{E}$ 损失, 防止氧气供给过量; 曝气系统的 $\dot{E}$ 损失以外部 $\dot{E}$ 损失为主, 说明在污水处理厂设计中, 节能的重点在于提高电机和鼓风机及传质的效率. $\dot{E}$ 分析方法和 $\dot{E}$ 效率指标结合, 可以从根本上明确能量的质损耗发生的位置和途径; 而一般的能量平衡模型仅能反映能量形态的变化和流向, 不能揭示能量损失的根本原因. 故 $\dot{E}$ 分析方法可用于指导污水处理厂具体环节的节能降耗, 为系统的节能工作进行铺垫.

参考文献:

- [1] 高 旭, 龙腾锐, 郭劲松. 污水生物处理 $\dot{E}$ 平衡分析方法研究() [J]. 环境科学学报, 2004, 24(6): 950—955
- [2] 高 旭. 城市污水处理工艺能量平衡分析研究和应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2002: 85—89
- [3] Henze M, Harremöes P, Jansen J C, et al. Wastewater Treatment-Biological and Chemical Processes (Second Edition) [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1997
- [4] 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, 1999
- [5] 张自杰, 周 帆. 活性污泥生物学与反应动力学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989
- [6] Water Environment Federation. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants-Volume : Liquid Treatment Process. Fourth Edition [M] New York: WEF Manual of Practice 8. ASCE Manual and Report on Engineering Practice, 1998: 1182—1184

污水生物处理单元^㉓平衡分析方法研究()

高 旭, 龙腾锐, 郭劲松 (重庆大学城市建设与环境工程学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:依据热力学第二定律建立了污水处理单元^㉓平衡分析的灰箱模型, 提出了进行处理单元过程^㉓评价的指标体系. 在热力学意义上, 污水生物处理是通过微生物内部的^㉓耗散来消耗污水污染物能量的过程, 推动该过程加速进行需要耗费外部的^㉓. 因此, 节能的主要目的是节^㉓, 即应防止推动力过剩造成反应器单元的外部^㉓损失. 这一方法体系将为合理科学评判处理过程能耗机制奠定重要的理论基础.

关键词:污水; 生物处理; ^㉓平衡; 灰箱模型; ^㉓效率

Study on exergy balance analyzing approach for biological wastewater treatment unit()

GAO Xu, LONG Tengrui, GUO Jinsong (Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045)

Abstract: Based on the second law of thermodynamics, exergy balancing gray box model for wastewater biological treatment unit is established, and exergy utilization index system is advanced to evaluate treatment units. In a sense of thermodynamics, biological wastewater treatment is a process that energy of pollutants is consumed through interior exergy dissipation in microorganisms. Exterior exergy is required to accelerate the process. Therefore, the main purpose of energy conservation is the exergy conservation, which means that the exterior exergy loss of reactor units from the superfluous impetus must be prevented. This approach and system would establish the significant foundation for rational and scientific evaluation on energy consuming mechanisms in treatment process.

Keywords: wastewater; biological treatment; exergy balance; gray box model; exergy efficiency

对于城市污水处理这类能量密集型的行业, 其能量分析研究是以化工过程的热力学分析方法为基础的. 按热力学基本原理分析、评价装置、过程中的能量损失的大小、原因及分布情况, 确定过程的效率, 为提高能量利用率、制定节能措施及实现处理过程最佳化提供依据. 按照能量分析所依据的热力学定律的不同, 能量分析模型可分为以热力学第一定律为基础的能量衡算模型和以热力学第一、第二定律结合为基础的^㉓分析模型. 笔者曾撰文阐述能量衡算分析^[1], 本文拟进一步探讨^㉓平衡分析的理论与应用.

1 热力学第二定律与污染物的化学^㉓

能量中可以无损耗地转化为功的部分, 即能流中的有用部分, 可定义为^㉓(exergy)^[2]. ^㉓平衡分析也就是对体系能量的质的变化、损耗进行研究.

Rant^[3]最早提出用^㉓来描述基于第二定律的过程热力学效率. 处于一定热力学状态的体系, 只要其温度、压力、组成等与环境有差别, 便会发生传热、膨胀、扩散、化学反应等自发过程,

收稿日期: 2003-08-28; 修订日期: 2004-06-05

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

作者简介: 高 旭(1971—), 男, 讲师(博士), hughgao@21cn.com, 02365120768