

污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析

吴媛媛^{1,2}, 周小红¹, 施汉昌^{1*}, 邱勇¹

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 以无锡芦村污水处理厂四期曝气池为研究背景, 采用尾气法测定了微孔曝气头在实际污水厂正常运行工况下的充氧性能参数, 与理论清水中该值比较, 评价曝气头运行情况。结果表明, 在污水处理厂曝气池不同廊道分布的曝气头氧传质性能存在显著差异, 同一廊道的曝气头在一天内的氧传质能力变化不大。与清水条件相比, 实际工况下曝气池中的微孔曝气头充氧性能下降较大, 其中氧传质系数 K_{La} 、充氧能力 OC 和氧利用率 E_a 分别下降了 43%、57% 和 76%。

关键词: 微孔曝气头; 工况; 尾气法; 氧传质系数; 充氧能力; 氧利用率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0194-04

Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant

WU Yuan-yuan^{1,2}, ZHOU Xiao-hong¹, SHI Han-chang¹, QIU Yong¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Using the aeration pool in the fourth-stage at Wuxi Lucun Waste Water Treatment Plant (WWTP) as experimental setup, off-gas method was selected to measure the oxygenating ability parameters of micropore aerators in a real WWTP operating condition and these values were compared with those in fresh water to evaluate the performance of the micropore aerators. Results showed that the micropore aerators which were distributed in different galleries of the aeration pool had significantly different oxygenating abilities under operation condition. The oxygenating ability of the micropore aerators distributed in the same gallery changed slightly during one day. Comparing with the oxygenating ability in fresh water, it decreased a lot in the real aeration pool, in more details, under the real WWTP operating condition, the values of oxygen transfer coefficient K_{La} , oxygenation capacity OC and oxygen utilization E_a decreased by 43%, 57% and 76%, respectively.

Key words: microporous aerator; operation condition; off-gas method; oxygen mass transfer coefficient; oxygenating capacity; oxygen utilization ratio

目前污水处理厂为了提高氧转移效率普遍采用微气泡曝气系统^[1]。与中大气泡的曝气系统相比, 微孔曝气系统能节约 50% 的能耗^[2], 氧利用效率、动力效率、氧总转移系数较大, 但是同时具有阻力损失较大、容易堵塞、使用寿命较短等不足^[3]。实际的污水处理运行条件, 会使曝气器的传质性能产生很大变化, 而曝气器性能优劣差异, 可使能耗相差 50% 以上^[4]。因此, 污水处理厂需要及时地对曝气器的性能进行测量和评价, 才能进行日常维护和保养, 并且在充氧性能明显下降且不可逆转时及时更换新的曝气器, 使微孔曝气系统发挥最佳的节能效果。而实际污水中正常运行条件下曝气头的充氧性能正是一个直接反映曝气头传质、运行情况的参数。

然而, 目前国内外针对曝气传质的研究, 大部分只是根据具体水质进行实验室规模的模拟, 对于实际污水的传质也只限于对不含污泥的污水的研究。对曝气设备在实际污水处理工况下的曝气池泥水混

合物中的氧传质性能参数的研究很少。研究实际工况下曝气设备的氧传质系数(K_{La})、充氧能力(OC)、氧利用率(E_a)等充氧性能参数^[5]有助于认清污水水质、污泥菌群及工艺条件对氧传递过程的影响, 了解实际情况与理论的差异, 寻求曝气工艺的最佳操作参数、曝气系统的精确控制、优化运行, 以及对曝气系统性能评价继而进行日常维护、节能降耗具有十分重要的意义。目前, 确定曝气设备充氧性能的方法有稳态法、非稳态法、尾气法等。其中, 尾气法是一种典型的稳态分析方法, 该方法基于耗氧率和溶解氧浓度来确定 K_{La} , 而耗氧率则可以由气相中氧气的平衡来确定。通过该方法, 可在污水厂实际工艺运行条件下(相对恒定的 DO 值和气体流速)推导出曝气系

收稿日期: 2012-02-15; 修订日期: 2012-07-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07313-003)

作者简介: 吴媛媛(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为曝气传质, E-mail: wu-yy10@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hanchang@mail.tsinghua.edu.cn

统的氧传质系数^[6-9]。因此, 尾气法非常适合对污水厂曝气设备的实际性能研究。

本研究以无锡市芦村污水处理厂四期曝气池为对象, 利用尾气法测试和分析芦村污水厂微孔曝气系统的充氧能力, 并通过与清水中曝气性能的比较, 探讨曝气系统在实际工艺运行条件及清水条件下的充氧性能差异, 以期为污水厂曝气设备的维护改造、节能降耗提供理论支持。

1 氧传质理论

通过对曝气池氧含量的质量守恒分析, 当曝气池内及溢出尾气中的氧组分含量基本达到稳态时, 曝气系统的氧传质系数(K_{La} , h^{-1}) 计算公式为^[10]:

$$K_{La} = \frac{\rho \cdot Q(Y_{in} - Y_{out})}{V(c_s - c)} \quad (1)$$

式中 ρ 为氧比重, 20℃ 且相对湿度为 50% 时 $\rho = 1.33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; Q 为曝气量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; V 为曝气池体积, m^3 ; Y_{in} 、 Y_{out} 为输入空气、输出尾气中氧所占的占比; c_s 为混合液氧饱和浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c 为混合液氧浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

若测试条件不在 20℃, 可以采用如下公式对实测 $K_{La}(T)$ 进行修正:

$$K_{La}(20^\circ\text{C}) = K_{La}(T) \cdot 1.024^{(20-T)} \quad (2)$$

充氧能力 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$):

$$\text{OC} = K_{La}(20^\circ\text{C}) \cdot V \cdot c_s' \quad (3)$$

式中 c_s' 为 20℃ 清水氧饱和浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

氧利用率:

$$E_a = \frac{\text{OC}}{S} \cdot 100\% \quad (4)$$

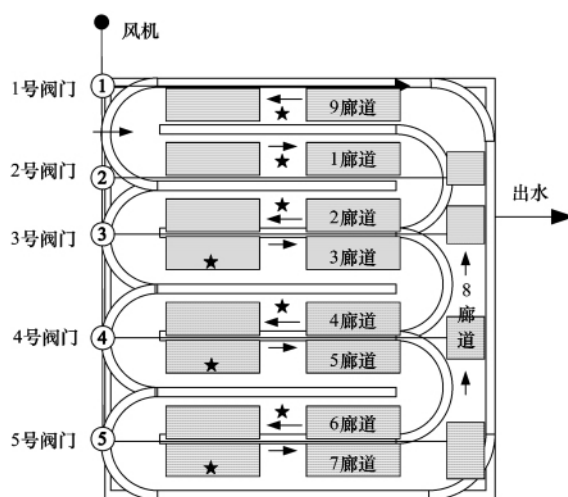
式中, S 为总供氧量, $S = \rho \cdot Y_{in} \cdot G_s$, G_s 为曝气头气量。

2 材料与方法

2.1 芦村污水处理厂曝气系统简介

无锡市芦村污水处理厂四期工程设计规模 10 万 $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$, 采用 2 组镜像, 单独进水的 A/A/O 工艺为主体生物处理工艺, 曝气池采用推流式池型, 按普通曝气活性污泥法设计, 其中好氧生物池中的曝气系统示意图如图 1 (包括廊道编号、阀门编号、水流方向、尾气法测试位置)。

芦村污水处理厂四期工程采用的曝气头为宜兴市诗画环保有限公司生产的 GY·Q 球形刚玉微孔曝气头, 技术规格和设计参数如下: 外形直径 240 mm, 高 94 mm, 厚 12 mm, 服务面积: $0.4 \sim 0.6 \text{ m}^2 \cdot \text{个}^{-1}$



粗线代表曝气主管线, 箭头表示水流方向, 粗线两侧平行细线代表曝气支管及曝气头分布位置, 星号代表尾气法测试位置

图1 生物池好氧段曝气系统示意图

Fig. 1 Aeration system of the aerobic section of the biological pool

(水深 4 ~ 6 m), 单个曝气头通气量: $2 \sim 6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.2 实验仪器

氧组分测量仪 (Z1100, 美国 ESC 公司), 秒表, 集气罩, 便携式溶氧仪 (YSI-86)。

2.3 测试方法

以单组曝气池为研究对象, 在实际运行工况条件下于曝气池上端安装集气罩, 收集逸出混合液面的气体, 用氧组分测量仪测试逸出气体中氧气所占体积分数 Y_{out} , 同时读取空气流量计流量 Q 和观测位置的氧浓度 c 。采用移动式测量方法, 移动集气罩沿曝气池各廊道分别布点测量各参数的变化情况, 此外, 在 2 号廊道读取上午 09:00、中午 12:00 以及晚上 17:00 这 3 个时间段的各参数变化情况。为减少误差, 氧组分和氧浓度读数读取 3 次, 计算时取 3 次测量的平均值。

为获得混合液的氧饱和浓度, 用塑料量杯从曝气池中取出约 1 L 混合液, 曝气 24 h, 测定饱和状态的溶解氧值, 记为 c_s' 。清水中的氧饱和浓度采用实测法, 取自来水, 用空气曝气至溶氧仪读数不再上升时, 记录此时的浓度值即为 c_s' 。

3 结果与讨论

3.1 清水条件下微孔曝气头充氧性能

根据建设部给水排水设备产品质量监督检测中心对 GY·Q 球形刚玉微孔曝气头的检测结果可知, 在清水条件, 单个曝气头服务面积为 1 m^2 , 有效水深 6 m, 测试水温为 $23.6 \sim 23.7^\circ\text{C}$ 时, 微孔曝气头充氧性能与气量的关系如表 1。根据公式 (3) 可知, 当

曝气头服务体积不变时, K_{La} (20℃) 与 OC 呈正比, 且 K_{La} (20℃)、OC 以及 E_a 都与曝气量呈乘幂关系^[11~13]. 因此, 可获得清水条件下 GY·Q 型微孔曝气头各充氧性能参数与曝气量的定量关系, 如式 (5) ~ (7) 所示. 因此可得出在单个曝气量为 $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 曝气头 K_{La} (20℃)、OC 和 E_a 分别是 1.23 h^{-1} , $0.088 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 48.3% , 用于与工况条件下比较.

$$K_{La} (20^\circ\text{C}) = 1.787 \cdot Q^{0.877} \quad (5)$$

$$\text{OC} = 0.128 \cdot Q^{0.877} \quad (6)$$

$$E_a = 45.94 \cdot Q^{-0.12} \quad (7)$$

3.2 污水厂工况条件下微孔曝气头充氧性能

根据芦村污水处理厂曝气池施工图及工艺运行参数可知, 曝气池中单个曝气头服务面积为 0.9

m^2 , 单个曝气头气量 $0.59 \sim 0.74 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 远小于清水中 $2.545 \sim 5.112 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的测试条件. 曝气池有效水深约 6 m , 测试时水温为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. 在 20°C 下测得的曝气池混合液溶解氧饱和浓度为 $c_s = 8.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 清水中的溶解氧饱和浓度实际测量值为 $c_s' = 10.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 利用尾气法获得的污水厂实际曝气量下微孔曝气系统充氧性能参数如表 2, 其中 K_{La} 近似等于 K_{La} (20℃).

表 1 清水条件下微孔曝气头充氧性能

气量 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	OC $/\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	E_a /%
2.545	0.293	41.103
3.819	0.415	38.774
5.112	0.541	37.789

表 2 利用尾气法测试曝气池中微孔曝气头的充氧性能

Table 2 OC and E_a values of the micropore aerators using off-gas method

项目	廊道序号	c $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Y_{out} /%	K_{La} $/\text{h}^{-1}$	OC $/\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	E_a /%
各廊道充氧性能	1	2.86	17.35	0.82	0.044 8	12.7
	2	2.14	18.74	0.40	0.022 0	6.9
	3	1.55	16.23	0.91	0.049 9	17.3
	4	1.224	17.5	0.66	0.036 4	12.0
	5	1.32	16.93	0.81	0.044 0	14.4
	6	1.95	17.8	0.76	0.041 4	10.7
	9	2.61	18.63	0.51	0.027 9	7.3
均值	—	—	—	0.70	0.038 1	11.61
2 号廊道早、中、晚充氧性能	上午 09:00	1.87	17.9	0.52	0.033	20.8
	中午 12:00	0.27	17.5	0.48	0.031	19.4
	下午 17:00	0.45	17.9	0.42	0.027	17.1
均值	—	—	—	0.47	0.025 7	16.16

3.3 曝气池不同廊道充氧性能与清水条件下充氧性能的比较及分析

工况下曝气池不同廊道的微孔曝气头充氧性能参数如表 2 所示, 此外, 通过公式 (5) ~ (7) 计算在平均气量 ($0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) 以及清水条件下的曝气头 K_{La} 、OC 以及 E_a . 各廊道曝气头充氧性能参数与清水条件下的比值 α 见图 2.

如图 2 所示, 工况下曝气池不同廊道的微孔曝气头充氧性能存在显著差异, 由于 K_{La} 与 OC 呈正比关系, K_{La} 与 OC 在各廊道的变化规律相同, 与 E_a 变化规律近似相同. 在同一曝气干管服务的廊道内, 前曝气区的氧传质性能优于中间推流区 (2、4 廊道 α 值分别小于 3、5 廊道 α 值). 已有的研究表明, 污水处理中的微孔曝气系统会受到污水水质、有机负荷、曝气量、曝气池运行方式、曝气头堵塞情况等多种因素的影响^[14]. 因而, 推流型曝气池沿池有机负荷的分布差异、各个廊道曝气量的不同等综合因素造成了各个廊道曝气头充氧性能的差异, 其中, 位

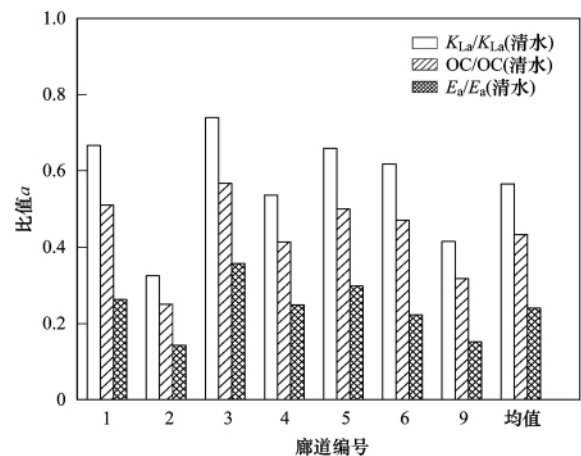


图 2 曝气池中各廊道微孔曝气头充氧性能参数与清水条件下的比值

Fig. 2 Ratios of micropore aerators' oxygenating ability parameters of each gallery of the aeration tank to those in fresh water

于推流型曝气池中间位置的第 5 廊道微孔曝气头的充氧性能与全池平均值最接近.

此外, 与清水条件相比, 污水中微孔曝气头的氧

传质系数 K_{La} 是清水中的 32% ~ 74% ,而充氧能力 OC 为清水中的 25% ~ 57% ,氧利用率 E_a 为清水中的 14% ~ 36% . 全池 K_{La} 、OC、 E_a 的平均值分别比清水条件下降了 43%、57% 和 76% .

3.4 曝气池不同时间曝气性能差异及分析

工况条件下 ,第 2 号廊道同一天不同时间段的曝气头充氧性能参数与清水条件下的比值如图 3 所示(根据测试当天 3 号阀门的气量变化可知 2 廊道单个曝气头的气量变化可以忽略不计) .

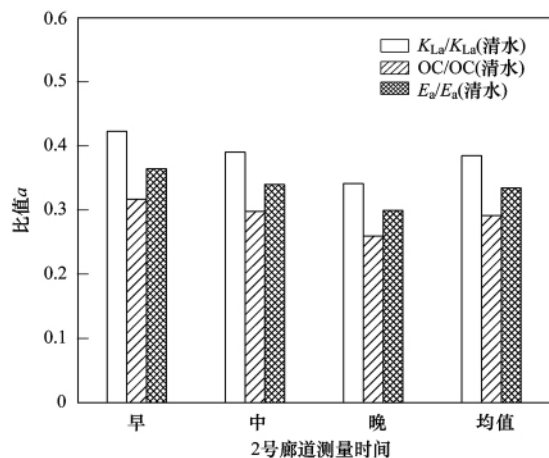


图 3 曝气池 2 廊道不同时间段微孔曝气头充氧性能参数与清水条件下的比值

Fig. 3 Ratios of micropore aerators' oxygenating ability parameters of the second gallery of the aeration tank to those in fresh water at different time

可以看出 ,曝气池同一位置的充氧性能参数在 1 d 内变化不大 ,各时间段充氧能力大小为: 早 > 中 > 晚. 对该测试点水质进行分析可知(见表 3) ,中午时间段曝气池 COD 浓度以及氨氮浓度最高 ,高有机负荷往往会导致曝气系统氧传递能力下降^[14] ,然而 ,可能是由于受气温及水温影响 ,中午时间段的曝气性能并不是所有时间段中最低的.

表 3 曝气池 2 廊道水质情况 /mg·L⁻¹

Table 3 Water quality of the second gallery of the aeration tank /mg·L⁻¹

时段	COD	NH ₄ ⁺ -N
早	190. 26	1. 702
中	282. 24	2. 660
晚	233. 10	1. 373

4 结论

(1) 利用尾气法获得的工况下曝气池全池范围内微孔曝气头的充氧性能参数存在显著差异 ,其中前曝气区的氧传质性能优于中间推流区 ,位于推流

型曝气池中间位置的 5 廊道曝气头充氧能力接近全池平均值.

(2) 与清水条件相比 ,实际工况下 ,曝气池泥水混合物中的微孔曝气头充氧性能下降较大 ,其中氧传质系数 K_{La} 、充氧能力 OC 和氧利用率 E_a 分别下降了 43%、57% 和 76% . 因为芦村污水处理厂四期正常运行已有 3 个月 ,所以若以清水条件下的微孔曝气头氧传质性能参数指导实际污水处理厂的曝气系统运行可能会产生较大的误差. 同时 ,也反映了在运行 3 个月 after 实际工况下微孔曝气头的传质性能 ,如果进一步随时间测量 ,则会得到曝气头传质性能明显下降的时间 ,为日常维护和节能降耗提供指导.

(3) 同一廊道的曝气头在一天内的氧传质能力变化不大 ,而水质从早到晚有着一个明显的峰值 ,这说明曝气池泥水混合液中的污泥有一定的抗击冲击负荷的能力 ,不会使曝气头传质产生影响.

致谢: 本研究得到了清华大学水环境重点实验室和无锡芦村污水处理厂的支持和帮助 ,在此表示感谢.

参考文献:

[1] 欧阳云生,贺玉龙,倪明亮. 邳州市污水处理厂 A²/O 微曝氧化沟系统的设计[J]. 中国给水排水,2008,24(22): 30-33.

[2] 刘坤,高廷耀. 关于微孔曝气系统性能及其设计的探讨[J]. 净水技术,2002,21(4): 5-8.

[3] 牛克胜,牟晋鹏,戴新,等. 浅谈橡胶膜片式微孔曝气装置的日常维护及保养[J]. 给水排水,2005,31(5): 96-97.

[4] 张志峰,虞伟权,薛秀燕. 微孔曝气器合理选用探讨[J]. 给水排水,2007,33(8): 101-103.

[5] 张自杰,林荣忱,金儒霖. 排水工程[M]. (第四版) 北京: 中国建筑工业出版社,2000. 143-150.

[6] Standards ASCE/EWRI (2-06). Measurement of oxygen transfer in clean water[S].

[7] Standards ASCE (18-96). Standard guidelines for in-process oxygen transfer testing[S].

[8] Pratt S, Zeng R, Yuan Z, et al. Comparison of methods for the determination of K_{LaO_2} for respirometric measurements[J]. Water Science and Technology, 2004, 50(11): 153-161.

[9] Redmon D, Boyle W C, Ewing L. Oxygen transfer efficiency measurements in mixed liquor using off-gas techniques [J]. Water Pollution Control Federation, 1983, 55(11): 1338-1347.

[10] 戴克志,穆瑞林,刘大军. 曝气池尾气分析装置的研究[J]. 中国给水排水,1993,9(1): 21-23.

[11] Zamouche R, Lehocine M B, Meniai A H. Oxygen transfer and energy savings in a pilot-scale batch reactor for domestic wastewater treatment [J]. Desalination, 2007, 206(1-3): 414-423.

[12] 任锋. 微孔曝气装置的设计[J]. 上海环境科学,1990,9(4): 43-44.

[13] 刘星. 曝气技术中氧传质影响因素的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学,2008.

[14] 李永光,曹瑞钰. 污水处理中影响微孔曝气充氧性能因素的研究[J]. 新疆环境保护,2004,26(3): 5-8.