

## 关于微孔曝气系统性能及其设计的探讨

刘坤 高廷耀

(同济大学城市污染控制国家工程研究中心 上海 200092)

X7 A

**摘要** 微孔曝气是一种高效的曝气方式。该文结合国内外资料 and 实际试验情况,对微孔曝气的各种性能进行了探讨,并对该系统的设计过程作出详细介绍,为污水生物处理工艺中推广应用微孔曝气提供科学理论依据。

**关键词** 微孔曝气器 氧利用率  $E_A$  实际需氧量 AOR 标准需氧量 SOR

### Research on the Performance and Design of Fine Bubble Aeration System

Liu Kun Gao Tingyao

(National Engineering Research Center for Urban Pollution Control Shanghai 200092)

**Abstract** Fine bubble aeration is a kind of high efficient aeration processes. Based on the domestic and overseas documents and practical testing research, in this article research on the various performances of fine bubble aeration system, and the whole design process of this system in detail, which can provide the scientific and theoretical basis of the application of fine bubble aeration in biological wastewater treatment were introduced.

**Keywords** fine bubble diffuser oxygen - utilization efficiency  $E_A$  actual oxygen requirement AOR standard oxygen requirement SOR

#### 1 前言

在活性污泥法处理污水的生化过程中需要大量的溶解氧,因此曝气成为进行生物处理的核心环节,它在供氧、去除有害气体和代谢产物及使活性污泥悬浮与底质充分接触等方面发挥重要作用。为此,探讨良好的曝气方式就成为进一步提高生物处理工艺的重要途径。

#### 2 微孔曝气性能及特点

微孔曝气属于气泡曝气的一种,与穿孔管曝气、机械曝气和射流曝气等方式相比,具有能耗低,氧利用率高,搅拌能力强等优点<sup>[1]</sup>。本文主要对橡胶微孔曝气器的各种性能进行一定的探讨。

##### 2.1 微孔曝气器的结构特点

由于在布气盘(板)上布有均匀的微细小孔,故称微孔曝气。靠近出气孔处的气泡直径  $d$  可达 1~3mm,属于小气泡。在气泡呈柱状上升逐渐合并变大的过程中,仍可保持中气泡( $d$  在 3~6mm 内)的曝气范围内。在曝气系统中,氧是通过气泡表面传入液相的。故在等量氧气条件下,气泡总表面积多少,直接影响传入液相的氧量。气泡直径与比表面积的关系见表 1。

表 1 气泡直径与比表面积的关系

气泡直径 $d(\text{mm})$	总表面积 $\pi d^2(\text{mm}^2)$	体积 $\pi d^3/6(\text{mm}^3)$	比表面积 $6/d(\text{mm}^{-1})$
0.1	0.0314	0.00052	60.38
0.5	0.79	0.065	12.15
1.0	3.14	0.52	6.04
2.0	12.56	4.19	3.00
3.0	28.26	14.13	2.00
4.0	50.24	33.28	1.51
5.0	78.50	65	1.21
6.0	113.04	112.32	1.01

由表 1 可以看出,气泡的比表面积与气泡的直径成反比。微孔曝气器产生的 2mm 的微小气泡其比表面积为  $3.0\text{mm}^{-1}$ ,比穿孔管曝气产生的大于 6mm 大气泡的比表面积( $<1.01\text{mm}^{-1}$ )大 3 倍以上。因此在微孔曝气中,气泡中氧与液体界面接触更充分,氧利用率更高,能耗更低。从国内外众多与大气泡穿孔管曝气的对比试验可以得出:微孔曝气器可节约 50% 左右的能耗<sup>[2]</sup>。

##### 2.2 微孔曝气性能测定试验

###### 2.2.1 微孔曝气的 $K_{La}$ 和氧利用率 $E_A$

曝气过程中,在水质、风量、水温等因素不变的

条件下,曝气装置的充氧能力与  $K_{La}$  值成正比,故可用  $K_{La}$  值的大小来衡量曝气装置的优劣。

在 2 个  $0.7 \times 0.7 \times 5.2\text{m}$  的立式不锈钢反应池中进行试验,有效水深 4.5m,其中分别放置一个型号不同的盘式微孔曝气器进行供氧。试验对象为清水和化工染料废水。

通过试验可以得出不同水质的  $K_{La}$  值(见表 2)。

表 2 不同曝气器氧的总传递系数  $K_{La}$

曝气器型号	试验对象	$K_{La}(20^\circ\text{C})$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$\alpha$ 值	$\beta$ 值
I 型	清水	7.75	0.65	0.76
	污水	4.91		
II 型	清水	7.55	0.62	0.79
	污水	5.02		

(单个曝气器的气量  $Q=2.0\text{m}^3/\text{hr}$ )

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

根据  $\alpha$  和  $\beta$  值修正后所得的  $K_{La(T)}$ ,可以进一步进行微孔曝气器氧利用率的计算。

氧利用率  $E_A$  可以按下式计算:

$$E_A = \frac{OC}{\text{鼓风机的供氧量}} = \frac{K_{La} \cdot C_s \cdot V}{Q \times 21\% \times 1.43} \quad (1)$$

OC——充氧能力( $\text{kgO}_2/\text{h}$ );

V——反应池中液体体积( $\text{m}^3$ );

Q——曝气风量( $\text{Nm}^3/\text{h}$ );

21%——氧在空气中所占的百分比;

1.43——氧的容重( $\text{kgO}_2/\text{m}^3$ )。

则两种曝气器的平均充氧能力和平均氧利用率值见表 3。

表 3 I、II 型曝气器的充氧能力和氧利用率

水质	充氧能力 OC( $\text{kgO}_2/\text{h}$ )		氧利用率 $E_A$ (%)	
	I 型	II 型	I 型	II 型
清水	0.148	0.151	24.6	25.2
污水	0.076	0.077	12.6	12.9
硝化池混合液	0.053	0.054	8.5	9.0
曝气池混合液	0.056	0.057	9.4	9.5

(单个曝气器中的气量  $Q=2.0\text{m}^3/\text{hr}$ )

由表 2 和表 3 可以看出:

(1)使用微孔曝气装置,化工染料污水中的氧利用率可达 12~13%,即便是污泥浓度很高的混和液中,氧利用率也可达到 9.0% 左右。而根据有关资料可知,穿孔管曝气氧的利用率仅为 4% 左右,为此微孔曝气比穿孔管曝气的供气量可以成倍减少<sup>[2]</sup>。

(2)同种材质不同型号的微孔曝气器在清水和化工染料废水中的氧利用率却相差无几,因此单靠改变不同型号的曝气器来提高氧利用率作用不大。

### 2.2.2 搅拌能力的测定

进行一定的搅拌可使活性污泥与水中有有机物充分接触,保持良好性状的活性污泥,为生化反应创造条件。因此搅拌能力的大小也是衡量曝气装置性能好坏的重要指标。

本试验通过对不同位置的监测点测量 MLSS 的浓度分布,根据 MLSS 浓度分布的均匀程度来衡量搅拌能力的大小。在反应池中液面下 1m、2m 和 3m 处各设一个监测断面,每个断面选取池中和距池壁 15mm 两个测试点,进行 MLSS 的测定,测定结果表明各测试点的 MLSS 值几乎相同,保持在  $5\text{g}/\text{L}$  左右。即池中各点的污泥浓度是均匀的,说明微孔曝气具有较高的搅拌能力。

### 2.3 微孔曝气器的防堵

虽然微孔曝气是一种高效的曝气方式,也存在微孔容易堵塞等缺点。因此防止微孔曝气盘(板)的堵塞,是保证微孔曝气器高充氧性能及整个曝气系统能否正常运行的关键。

堵塞主要发生在与水接触的一侧及进气侧。一般在空气进入微孔曝气装置前设计安装空气过滤装置。国外资料中曾介绍过在使用微孔曝气器时对空气净化化的严格要求<sup>[2]</sup>。

日本有机化学株式会社在微孔曝气试验中,要求在鼓风机前设置空气除尘器,去除空气中直径为  $1\mu\text{m}$  尘粒的 90%。

英国霍克水处理公司规定,进入微孔曝气器的空气必须达到 95% 以上的除尘效率。该标准用于尘粒直径为  $0.2 \sim 2\mu\text{m}$  的场合。

法国德格雷蒙公司生产的圆盘形微孔曝气头,要求所用空气必须经过充分除尘,除尘后的空气含尘量应小于  $15\text{mg}/1000\text{m}^3$ 。

### 2.4 微孔曝气的清洗方式

微孔曝气装置经过长时间运行,或多或少要被堵塞,从而影响曝气效果,需要清洗以恢复其透气性。

清洗再生方式主要有:(1)在清洗车间进行清洗;(2)不拆曝气器但必须停止运行进行清洗;(3)不拆曝气器也不停止运行进行清洗<sup>[3]</sup>。一般常用现场停止运转,在不拆除曝气器的前提下,在曝气池中利用高压水冲并结合 10~22% 的盐酸进行酸洗,以解决外堵问题,使曝气器基本恢复原状。

### 2.5 微孔曝气器的布置

据国内外资料介绍,对推流式活性污泥法,曝气池多采用逐渐减弱的曝气系统。一般至少要分为三段,每段的供氧量以及扩散器的数量应按照生化需

要及曝气效率单独计算<sup>[4]</sup>。布置形式的示意图见图 1 和图 2。

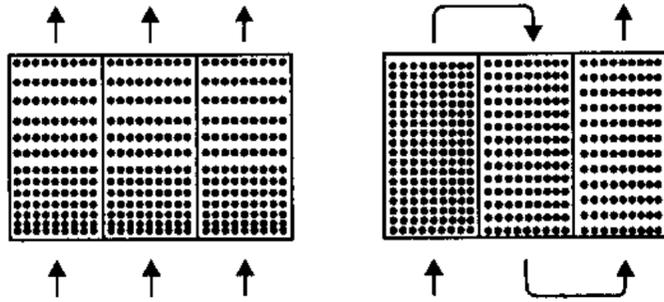


图 1 三廊道并联的逐渐减弱曝气系统

图 2 三廊道串联的逐渐减弱曝气系统

在活性污泥法的处理工艺中,氧的需求量在整个曝气池中变化很大。若该池的长宽比很大,一般需氧量在池的前部要求最大。当废水沿池通过时,水中的有机物质被氧化,需氧量也逐渐降低,在池末达到最低点。在逐渐减弱的曝气系统中,曝气装置中氧的分配是与需氧量的梯度曲线呈正比的。它是一种积极的空气分配系统。

逐渐减弱的曝气系统的优点主要是达到进一步优化运行和节能的效果。

但是在采用逐渐减弱的曝气系统时,还应注意如下两点:

第一,如果曝气池具有太大的长宽比或微生物的负荷太低,则混合所需的氧量可能超过微生物降解有机物所需的氧量,即存在“混合限制”。

第二,由于废水水质同样会影响氧利用率。对含表面活性剂高的废水而言,始端太高的曝气强度很容易导致大量气泡的形成,这时逐渐减弱的曝气系统就未必合适,此时往往会使用全池均匀曝气甚至逐渐增强的曝气系统。

### 3 微孔曝气系统的设计

#### 3.1 生化需氧量的确定

准确计算生化过程中的需氧量是微孔曝气系统的设计的关键。因为若生化过程实际需氧量计算不准确,就会导致曝气系统效率降低,能耗提高或供氧不足。

生化过程需氧量应考虑以下几部分:

(1)有机物或含碳物质氧化所需的氧量。

其中又包含了细胞合成及内源代谢的需氧量。在有机负荷较低时(即具有较长泥龄或较低的 F/M 负荷时),更应计入这部分需氧量。

(2)硝化过程需氧量

假定工艺是在具有硝化的状态下进行,则必须考虑硝化需氧量。

(3)氧化无机物的需氧量。

氧化污水中的无机还原性物质时也需要一部分氧。

(4)反硝化影响产生的需氧量。

若在生化处理过程中出现反硝化现象,则需氧量将有所降低。但是设计者很少以此作为设计值。

#### 3.2 微孔曝气系统设计计算

(1)实际需氧量 AOR 的计算

从理论上讲,计算 AOR 时,主要考虑碳源需氧量和硝化需氧量。

即  $AOR = O_{2(I)} + O_{2(II)}$

碳源需氧量  $O_{2(I)} = a'QSr / 0.68 + b'VX_V$  (2)

Q—废水流量( $m^3/d$ )

$a'$ —有机物氧化需氧系数( $kgO_2/kgBOD$ )

$b'$ —污泥自身氧化需氧率( $d^{-1}$ )

$Sr$ —有机物去除量( $kgBOD_5/m^3$ )

0.68— $BOD_5$ 与  $BOD_U$ 的比值

V—曝气池有效容积( $m^3$ )

$X_V$ —MLVSS 浓度( $kg/m^3$ )

硝化需氧量  $O_{2(II)} = 4.57QC_{NH_3-N}$  (3)

$C_{NH_3-N}$ —氨氮去除量( $kgNH_3-N/m^3$ )

Q—废水流量( $m^3/d$ )

(2)实际需氧量 AOR 与标准需氧量(标准状态下)SOR 值之间的转换

在进行曝气系统设计时,一般不以 AOR 值为设计值,而以 SOR 值作为其设计值,因此要将 AOR 值转换成 SOR 值。

$$SOR = \frac{AOR \cdot C_{s(20)}}{\alpha[\beta \cdot \rho \cdot C_{sb(T)} - C] \cdot 1.024^{(T-20)}} \quad [5,6] \quad (4)$$

$C_{sb(T)}$ —设计现场温度 T 时,鼓风机曝气池内混合液溶解氧饱和浓度的平均值( $mg/L$ );

$C_{s(20)}$ —水温  $20^\circ C$ ,大气压力条件下氧的饱和浓度( $mg/L$ )(可查表所得);

C—曝气池中的溶解氧浓度( $mg/L$ );

$\rho$ —所在地区实际气压与标准大气压的比值。

$$C_{sb(T)} = C_{s(T)} \left( \frac{P_b}{2 \times 1.013 \times 10^5} + \frac{O_t}{42} \right) \quad (5)$$

$C_{s(T)}$ —大气压力条件下,氧的饱和度( $mg/L$ );

$P_b$ —空气扩散装置出口处的绝对压力( $P_a$ ),  $P_b = P + 9.8 \times 10^3 H$ ;

H—空气扩散装置的安装深度(m);

P—大气压力( $1.013 \times 10^5 Pa$ );

$Q_t$ —气泡在离开池面时氧的百分比。

$$\alpha = \frac{K_{La} \text{ 废水中}}{K_{La} \text{ 清水中}}; \beta - \text{饱和因子}$$

通常 SOR 值要比 AOR 值高。一般情况下,实际工程所需的空气量较标准条件下的所需空气量多 33%~61%<sup>[7]</sup>。

设计时一般采用 SOR 值来表示所需氧量,减少设计人员与设备供应方之间的误解。

### 3.3 微孔曝气系统的设计示例

以化工染料废水为例,废水经过二级生物处理,第一级主要去除 BOD,第二级为硝化处理。该厂的污水处理量为 6100m<sup>3</sup>/d,水温为 37℃,生化池有效水深 4.5m,进水的 COD 负荷约为 5800kg/d,BOD/COD≈0.3,出水 BOD 约 10mg/L,氨氮去除量为 0.095kg/m<sup>3</sup>,曝气池出口处的溶解氧为 1.0mg/L(该值相对较低),MLVSS=2.25kg/m<sup>3</sup>

相关系数由试验确定(参考前述):

$$\text{取 } \alpha = 0.62, \beta = 0.79, E_A = 8.5\%$$

计算如下:

(1)一级生化处理池需氧量

$$\Delta BOD_5 = 5800 \times 0.3 - 10 \times 10^{-3} \times 6100 = 1679 \text{ kg/d}$$

$$S_r = 1679 / 6100 = 0.28 \text{ kgBOD}_5 / \text{m}^3$$

$$O_{2(I)} = a'QS_r / 0.68 + b'VX_v$$

$$= 0.60 \times 6100 \times 0.28 / 0.68 + 0.08 \times 5000 \times 2.25$$

$$= 2407 \text{ kgO}_2 / \text{d}$$

(2)硝化池需氧量

$$O_{2(II)} = 4.57QC_{\text{NH}_3-N}$$

$$= 4.57 \times 6100 \times 0.095$$

$$= 2648 \text{ kgO}_2 / \text{d}$$

(3)计算参数的确定

• 曝气器出口的绝对压力

$$P_b = 1.013 \times 10^5 + 9.8 \times 4.5 \times 10^3$$

$$= 1.454 \times 10^5 \text{ Pa}$$

• 气泡离开池表面时氧的百分比

$$Q_t = \frac{21(1-8.5\%)}{79+21(1-8.5\%)} \times 100\% = 19.56\%$$

曝气池平均溶解氧浓度  $C_{sb}$ :

$$\text{查表得: } C_{s(20^\circ\text{C})} = 9.17 \text{ mg/L}$$

$$C_{s(37^\circ\text{C})} = 6.7 \text{ mg/L}$$

则

$$C_{sb(37^\circ)} = 6.7 \left( \frac{1.454}{2 \times 1.013} + \frac{19.56}{42} \right) = 7.93 \text{ mg/L}$$

(4)AOR 与 SOR 的转化

$$\text{AOR} = 2407 + 2648 = 5055 \text{ kgO}_2 / \text{d}$$

$$\text{SOR} = \frac{5055 \times 9.17}{0.62[0.79 \times 1 \times 7.93 - 1] \times 1.024^{(37-20)}} = 9489 \text{ kgO}_2 / \text{d}$$

则,  $\text{SOR} / \text{AOR} = 1.88$

(5)系统所需空气量

$$Q = \text{SOR} / (1.43 \times 21\% \times 8.5\%)$$

$$= 371746 \text{ Nm}^3 / \text{d} = 15489 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

若曝气器的氧利用率达到 9.5%,则所需空气量将进一步降低 11%,为 13922Nm<sup>3</sup>/h。

## 4 结 论

(1)在不增加曝气风量的前提下,采用微孔曝气可以提高氧利用率,增强曝气强度,达到提高净化效率的目的;在不提高水中溶解氧含量的前提下,可以减少曝气风量,降低能源消耗。

(2)根据试验测定,橡胶微孔曝气器的氧利用率在清水中可以达到 25%左右,在化工染料废水中可达约 12%,对于含活性污泥的混合液而言,氧利用率可达 8.5%~9.5%。

(3)虽然在一般情况下,SOR 与 AOR 的比值在 1.33~1.61 之间,但是随着废水水质成分的复杂性,水温以及水中溶解氧含量的不同,SOR/AOR 比值也会发生较大的变化,所以必须通过具体实验来验证该比值。

(4)通过 3.3 中的实例可以得出,由于该化工染料废水水温较高,水中溶解氧含量偏低,导致 SOR/AOR 比值偏高,为 1.88,这进一步说明该系统需要更多的空气量来保证生物处理的效果。

### 参考文献

- 1 杨征,刘刚《微孔曝气在焦化废水处理中的应用研究》,《辽宁化工》2000.9 Vol.29, No.5
- 2 翟海峰《微孔曝气器述评》建筑技术通讯:《给水排水》1989(3)
- 3 王洪臣《微孔曝气系统的理论与工程实践》,《市政技术》1997(1)
- 4 王洪臣《微孔曝气系统的优化设计》,《给水排水》1995,21(8)
- 5 Design Manual of Fine Pore Aeration System, US-EPA, Cincinnati, OH, 1991
- 6 Wastewater Treatment Plant Design, WPCF& ASCE, NY, USA, 1991
- 7 《排水工程》中国建筑工业出版社

第一作者简介:刘坤,1997年出生,女,现就读于同济大学环境科学与工程学院,攻读水污染控制方向硕士学位。