

# 微孔曝气器充氧性能的影响因素

魏延苓, 齐鲁, 刘国华, 王洪臣, 李小冬, 庄健

(中国人民大学环境学院, 北京 100872)

**摘要:** 基于双膜理论, 研究者提出了曝气器充氧过程中氧传质的基本方程  $dp/dt=K_{La}(\rho^*-\rho_1)$ , 叙述了氧总转移系数  $K_{La}$  和饱和 DO 质量浓度  $\rho^*$  的主要影响因素, 包括几何参数(曝气器浸没深度、曝气器密度、池表面积、曝气器布局)、运行工况(水平流、通气量、污泥龄)和水质条件(表面活性剂、TDS 含量)。在一定范围内增大池表面积、通气量或施加水平流均可提高  $K_{La}$ , 微孔曝气器采用均匀布置方式或增大曝气器浸没水深有利于氧传质, 提高氧转移效率; TDS 的质量浓度超过 2 g/L,  $K_{La}$  将明显增大, 但曝气器浸没深度、曝气器密度和 TDS 含量对微孔曝气器充氧性能的影响和机理解释仍需进一步研究。温度越低, 压力越大或水深越深,  $\rho^*$  越大, 这有利于提高曝气器的充氧能力。对微孔曝气器充氧性能影响因素的研究, 可为污水处理厂曝气系统的优化运行提供参考。

**关键词:** 微孔曝气器, 氧总转移系数, 饱和溶解氧, 曝气器密度, 通气量, 表面活性剂

**中图分类号:** X703.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3770(2014)02-0001-007

近 10 年来, 我国城市污水处理设施建设发展迅速, 根据《关于全国城镇污水处理设施 2011 年第 4 季度建设和运行情况的通报》记录, 至 2011 年全国城镇污水处理厂已发展到 3 135 座, 相比 2001 年的 300 座, 增涨了 10 倍<sup>[1]</sup>。目前污水处理的主导工艺是好氧生物处理, 而好氧过程离不开曝气设备<sup>[2]</sup>。因为曝气是污水生物处理过程中一个重要的环节, 不仅为微生物提供足够的溶解氧(DO), 而且还承担着将混合液搅拌混合均匀的作用。但同时曝气也是污水处理过程中的主要能耗系统, 约占总能耗的 45%~75%<sup>[3]</sup>。宋连朋等对我国城镇污水处理厂建设运行现状及能耗进行了分析, 指出, 至 2010 年底, 我国运行的污水处理厂单位平均电耗量为 0.307 kWh/m<sup>3</sup>, 年耗电量超过 10×10<sup>9</sup> kWh<sup>[4]</sup>。金昌权和汪诚文将污水处理厂全厂能耗按能耗特点分成 3 个单元, 即预处理单元、生化处理单元和污泥处理单元, 其中生化处理单元是污水处理厂的核心单元, 也是主要耗能节点, 占全厂能耗的 50%~70%<sup>[5]</sup>。生化处理单元的耗能主要是指曝气系统的能耗。能量消耗大、运行费用高已给相关市政部门、生产单位带来了沉重的经济负担。

提供曝气的设备按产生气泡的大小可分为大气泡曝气器和微孔曝气器, 通常认为气泡直径大于 50

mm 的为大气泡曝气器(或粗孔曝气器), 而微孔曝气器产生的气泡直径要小于 5 mm<sup>[6]</sup>。微孔曝气器通过小孔、膜片或多孔材料上的微孔释放压缩空气, 从而产生微气泡<sup>[7]</sup>。微孔曝气器能够产生较小的气泡, 从而具有较高的氧转移效率<sup>[8]</sup>。相比大中气泡曝气, 微孔曝气系统能节约 50%的能量<sup>[9-10]</sup>。微孔曝气器由于其较高的氧转移效率和理论动力效率及较低的能耗已被广泛应用于污水生物处理过程。由此, 研究微孔曝气器的充氧过程对污水处理的优化运行以及节能降耗具有重要意义。

本文叙述了微孔曝气器充氧性能的影响因素, 即饱和 DO 质量浓度  $\rho^*$  和氧总转移系数  $K_{La}$ , 其中  $K_{La}$  是表征微孔曝气器充氧性能的重要指标。以期能为污水处理厂的优化运行提供参考。

## 1 曝气器充氧过程

曝气器的充氧过程, 其实就是氧传质过程。这一过程主要是气相与液相的传递, 该过程可分为 3 步。首先, 氧气分子由气相转移到液体表面, 而后在气-液界面达到平衡, 最后, 氧分子由接触面进入液体内部。基于双膜理论, 实际曝气系统中描述氧传质的过程, 可用下式表示:

收稿日期: 2013-07-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063404), 国家水体污染控制与治理重大科技专项(2011ZX07316-001)

作者简介: 魏延苓(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制工程, 联系电话: 18811590429, 电子邮件: wei\_yanling@126.com

联系作者: 齐鲁, 电子邮件: qilu@ruc.edu.cn

$$d\rho/dt=K_{La}(\rho_{\infty}^*-\rho_L)$$

式中  $\rho_L$  为  $t$  时刻液体中的 DO 的质量浓度。

可以看出,影响氧传质过程的重要参数为  $\rho_{\infty}^*$ 、 $K_{La}$  和  $\rho_L$ 。实际污水处理厂中,曝气池 DO 的质量浓度通常维持在 2 mg/L 左右,故影响曝气器充氧过程的主要参数为  $\rho_{\infty}^*$  和  $K_{La}$ 。

$\rho_{\infty}^*$  虽与曝气器无直接联系,但其大小影响曝气器的氧转移能力,即氧转移速率 SOTR。 $\rho_{\infty}^*$  越大,氧转移速率 SOTR 越大。故本文叙述饱和 DO 的影响因素,目的—是为提高曝气器的充氧能力做参考;二是为比较不同测试条件下的曝气器充氧性能,即在不同测试工况条件下测得的  $\rho_{\infty}^*$  应校正到标准条件下(20 °C, 0.1 MPa)进行比较。

## 2 氧总转移系数

影响  $K_{La}$  的因素主要包括几何参数(曝气器浸没深度、曝气器密度、池表面积)、运行工况(曝气器布局、水平流、通气量)和水质条件(TDS 和表面活性剂含量)等。

### 2.1 曝气器浸没深度

Pöpel 和 Wagner 研究曝气器浸没水深(3.5~12 m)对  $K_{La}$  影响的结果表明,体积氧转移速率 VOTR 随水深的增大而增大<sup>[11]</sup>。实际污水厂的实验数据表明,SOTE 和理论动力效率 SAE 均随曝气器浸没深度线性增大<sup>[12]</sup>。Michael K Stenstrom 在水深分别为 1.52、3.05 和 4.57 m 的清水中测试了管式微孔曝气器的充氧性能,结果显示,SOTE 随曝气器浸没深度的增大而增大。汤利华等通过实验研究了水深对曝气过程中  $K_{La}$  的影响,得出水深在 2.5~4.5 m 对  $K_{La}$  有明显影响,水深越深  $K_{La}$  越低<sup>[13]</sup>。俞庭康对橡胶模曝气器充氧性能与水深关系的研究表明,在水深 4~6 m 内  $K_{La}$  迅速下降,在 6~8 m 内  $K_{La}$  逐渐增大<sup>[14]</sup>。冯俊生和万玉生建立起曝气器充氧性能与曝气器浸没水深的数学模型,但计算结果与俞庭康的实验结果相反,在水深 5~8 m 内,模型计算结果显示  $K_{La}$  随水深逐渐降低<sup>[15]</sup>。

由此,可以得出曝气器浸没深度对氧转移效率的影响已很明显,SOTE 随曝气器浸没水深的增大而增大。这是因为水深增加,增大了氧分压,进而增大了传质推动力。此外,水深增加,使得气泡停留时间延长,这有利于氧的传质。

但曝气器浸没深度对  $K_{La}$  的影响并不多且仍存在争议。根据上述分析,在水深低于 6 m 时  $K_{La}$  随浸没深度的增大而减小,但水深超过 6 m 时  $K_{La}$  的

变化规律并不确定。俞康庭等的研究结果是水深在 6~8 m 内  $K_{La}$  逐渐下降。但冯俊生和万玉生建立起  $K_{La}$  与曝气器浸没水深的数学模型,但计算的结果与俞庭康的实验结果相反。

### 2.2 曝气器密度

曝气器密度是指曝气器面积所占总池表面积的分额。Pöpel 和 Wagner 基于文献综述得出曝气器密度越大,比氧吸收速率 SOA(标准状态下,单位浸没水深的体积氧转移速率)越大的结论<sup>[11]</sup>。Kenneth I Ashley 等人在内径 0.29 m、高 1.06 m 的玻璃圆柱装置中,研究了曝气器数量对氧转移过程的影响,结果表明,在恒定的通气量条件下,2 个曝气器比 1 个曝气器的  $K_{La}$  增大 25%<sup>[16]</sup>。Paulson 研究钟罩型曝气器氧转移效率的结果显示,在 4.6 m 深的水池中,曝气密度为 6.9%~18.3%时,SOTE 随曝气密度的增大而增大<sup>[17]</sup>。EPA 微孔曝气器设计手册中也有类似的结果<sup>[18]</sup>。Huibregtse 等研究了圆盘式和钟罩型曝气器密度的影响。圆盘式曝气器密度为 7.6%、11.6%和 15%,结果表明,SOTE 随曝气密度的增大而增大,但并不总是线性的<sup>[19]</sup>。

恒定的通气量,曝气器个数的增加,使  $K_{La}$  增大,这是由于曝气器个数增多,即出气面积增大,使气泡产生速度减小,进而气泡直径减小,故界面面积增大, $K_{La}$  增大。在一定范围内,SOTE 随曝气器密度的增加而增大,但是否成线性关系仍需进一步验证。此外可推测曝气器密度至一定值后,SOTE 可能变化不再明显。

### 2.3 池表面积

Kenneth I Ashley 将泡沫塑料覆盖在池表面,目的是为考察池表面积对  $K_{La}$  的影响,其中池表面积与体积比为 0.94 m<sup>-1</sup>,结果显示与不覆盖泡沫塑料(自由表面)相比,表面覆盖泡沫塑料  $K_{La}$  略有下降<sup>[16]</sup>。Nielson 利用漂浮的塑料覆盖池表面,进行了相似的实验,但池表面积与体积比相对较大,为 1~10 m<sup>-1</sup>,也得到将表面覆盖后  $K_{La}$  下降的类似结论<sup>[20]</sup>。

池表面被覆盖以后,阻止了池表面的空气向水中的转移,即阻止了池表面的富氧,从而降低了  $K_{La}$ 。

### 2.4 曝气器布局

目前,曝气池中的曝气器布局主要有单旋流式(Single Spiral Roll)、中心式、双旋流式(Dual Spiral Roll)、交叉式(Cross Roll)、均匀布置(Total Floor Coverage)等,见图 1<sup>[21]</sup>。

早在 1915 年,曝气器的布置方式就被认为对氧

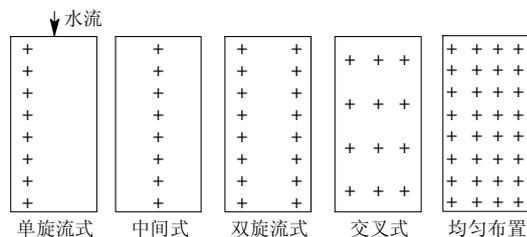


图1 曝气器布置方式  
Fig.1 Air diffuser layout

转移过程具有较大影响<sup>[21]</sup>。Hurd 建议采用单旋流的布置方式,即沿曝气池的一侧布置<sup>[22]</sup>。单旋流布置方式被认为比均匀布置方式的气-液接触时间长,有利于传质。

直到 Ernest 研究证明曝气器采用均匀布置方式的氧转移能力要高于单旋流布置方式,研究者开始关注均匀布置方式<sup>[23]</sup>。Leary 的研究证明了曝气器沿曝气池长和宽布置,即交叉式布置方式比单侧布置方式的氧转移效果好<sup>[24]</sup>。Downing 等证明了曝气器采用均匀布置方式比沿曝气池中心线或沿曝气池一侧布置(单旋流布置)的氧转移效率高 10%~20%<sup>[25]</sup>。Huibregtse 等总结了几种曝气器布置方式(单螺旋、双螺旋和均匀布置方式)对氧转移的影响,指出曝气器采用均匀布置方式的氧转移能力 OTR 要高于单螺旋或双螺旋布置方式<sup>[19]</sup>。Markus Gresch 利用 CFD 模拟实际污水厂曝气池中的流态,指出曝气器的布局对曝气池中的流场有较大影响<sup>[26]</sup>。由此可以看出,曝气器采用均匀布置方式有利于氧传质。

Bewtra 和 Nicholas 指出,曝气器的布置方式会影响气泡的停留时间。曝气池中气泡的上升速度,可认为是液体被气体搅起的上升速度  $v_w$ ,与气泡在曝气器出口处的生成速度  $v_b$  之和。曝气器在曝气池中采用单螺旋布置方式的液体上升速度  $v_w$  是气泡生成速度  $v_b$  的 3~5 倍,导致气泡的停留时间较短,从而影响了氧转移效率。采用均匀布置方式,混合液上升速度仅为  $v_b$  的 1~2 倍,故气泡停留时间较长<sup>[27]</sup>。

## 2.5 水平流

Dasilva Deronzier 等研究了水平流对微孔曝气器的影响<sup>[28]</sup>。在 1 400 m<sup>3</sup> 环形池中安装了 2 个叶片搅拌机,曝气器浸没深度为 2.75 m,曝气密度为 5.4%,即气速为 1.33 m<sup>3</sup>/h(单个曝气器标准状态下),实验结果如图 2。

由图 2 可以看出,随水平流速  $v$  的增大,氧转移效率 SOTE/h 逐渐增大。

Gillot and Capela 在 400 L 中试氧化沟(长 1.2 m、

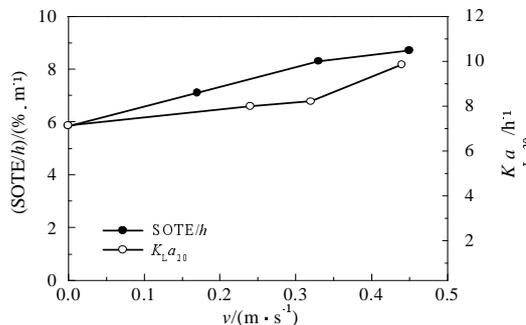


图2 水平流速对 SOTE 和  $K_{La}$  的影响

Fig.2 The effect of horizontal flow velocity on SOTE and  $K_{La}$

宽 0.6 m、高 0.5 m) 中研究了清水条件下水平流对氧转移的影响。当水平流速从 0 分别增大至 0.24、0.32、0.44 m/s 时,  $K_{La}$  分别增大至 12%、15%、38%<sup>[29]</sup>。这是水平流中和了液体竖直循环流动(螺旋流),增大了气液接触时间,从而增大了  $K_{La}$ 。

## 2.6 通气量

对于通气量对氧转移过程的影响,国内外已有很多研究。Capela 指出  $K_{La}$  随气速的增大而线性增大<sup>[30]</sup>。Kenneth I Ashley 的研究表明,气速增大为原来的 2 倍(从 9.41 L/min 到 18.81 L/min),  $K_{La}$  增大 90%<sup>[18]</sup>。Stephanie Vermande 等人在水深 1.2 m、体积为 7.5 m<sup>3</sup> 的曝气氧化沟中试装置中,研究了气速对曝气的影响,结果发现气含率随气速增大而增大,故气液界面面积增大,  $K_{La}$  增大<sup>[31]</sup>。

李小冬等研究了通气量对微孔曝气器氧转移过程的影响<sup>[32]</sup>。中试结果表明,  $K_{La}$  随通气量增大而增大。通气量从 58.98 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) 增加到 235.9 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) 时,  $K_{La}$  从 0.025 min<sup>-1</sup> 增加到 0.083 min<sup>-1</sup>。通气量对  $K_{La}$  的影响,可分开讨论通气量对  $K_L$  和  $a$  的影响。通气量增大,接触面积增大。不同文献中,通气量对  $K_L$  的影响研究结果不同。有研究表明,表观气速(单位曝气面积的通气量)在 0~1.5 cm/s 时,  $K_L$  随表观气速的增大而下降<sup>[33]</sup>。Pisut Painmanakul Gilles Hebrard 小试结果表明,气体体积流量 >0.5 mL/s 时,  $K_L$  保持恒定,气体体积流量 <0.5 mL/s 时,  $K_L$  逐渐增大<sup>[34]</sup>。

总体上看,通气量对  $K_L$  的影响没有对接触面积的影响重要,通气量对  $K_{La}$  的影响主要是对接触面积的影响。通气量增大,气液接触面积增大。这是由于通气量增大,气含率随之增大。

## 2.7 污泥龄

Gillot 指出影响微孔曝气器性能的所有因素(几何参数、运行工况、水质)中,污泥龄是影响  $\alpha$ (污水中的  $K_{La}$  与清水中的  $K_{La}$  之比)主要因素,并指出  $\alpha$

随污泥龄的增大而增大。污泥龄在 15 d 左右  $\alpha$  在 0.44~0.78, 污泥龄为 25 d  $\alpha$  在 0.73~0.98<sup>[35]</sup>。

Rosso 指出平均细胞停留时间 (MCRT) 即污泥龄和标准风速 (单位水深、单位曝气面积的风速) 是影响工艺条件下氧转移效率最主要的因素, 并且  $\alpha$  随污泥龄的增大而增大<sup>[36]</sup>。

污泥龄对微孔曝气器  $\alpha$  的影响, 主要在于污泥龄决定了污染物的降解程度, 尤其是表面活性剂。在较长的污泥龄条件下, 表面活性剂降解较为彻底, 故使表面活性剂的抑制作用得以消除。

## 2.8 表面活性剂

污染物质对氧转移的抑制早已有研究<sup>[37]</sup>。研究表明, 影响氧转移的主要污染物质是表面活性剂<sup>[38]</sup>。

Eckenfelder 和 Barnhart 研究有机污染物对氧转移的影响, 指出十二烷基硫酸钠 (SDS) 的质量浓度为 15 mg/L 时, 与清水条件相比  $K_{La}$  下降为原来的 1/2<sup>[39]</sup>。

表面活性剂对曝气系统中  $\alpha$  的影响已有很多研究。Gillot and Hédut 对采用延时曝气硝化工艺的 14 座污水厂进行了测定, 结果显示, 对于生活污水较低的有机负荷率 ( $F/M$ )  $\alpha$  在 0.44~0.98<sup>[37]</sup>。Wagner 和 Pöpel 研究了不同含量的离子型和非离子型表面活性剂对  $\alpha$  的影响, 结果显示, 表面活性剂使  $K_{La}$  降低。质量浓度 5 mg/L 不同类型的表面活性剂  $\alpha$  在 0.65~0.80 内, 且非离子表面活性剂比阴离子表面活性剂对  $\alpha$  的影响更大<sup>[40]</sup>。Painmanakul 和 Hebrard 研究了不同污染物质包括 NaCl、糖原、失活污泥和表面活性剂对  $\alpha$  的影响, NaCl 的质量浓度为 4 g/L 的溶液  $\alpha=1.053$ , 含糖原质量浓度为 250 mg/L 的溶液  $\alpha=0.925$ , 含失活污泥质量浓度为 250 mg/L 的溶液  $\alpha=1.19$ , 在阴离子表面活性剂 SDS 的质量浓度为 200 mg/L 的水溶液  $\alpha=0.602$ , 表面活性剂较其他污染物质对  $\alpha$  的影响更大<sup>[36]</sup>。

有文献指出, 污染物质对  $K_{La}$  的影响, 与表面张力有关<sup>[41-42]</sup>。向水中添加表面活性剂, 会导致表面张力下降<sup>[43]</sup>。Rosso 指出, 表面活性剂在界面积累, 使接触面变得粘滞, 降低了传质系数, 从而降低了传质速率<sup>[44]</sup>。Marupatch Jamnongwong 等指出, 表面活性剂带来的影响, 主要是 2 个正反方面的影响: 一方面, 表面活性剂抑制了气泡的并聚, 进而增大了气液接触面积; 另一方面, 降低了气泡周围液膜的湍动水平。2 方面的影响使  $K_{La}$  降低<sup>[45]</sup>。

由此可以看出, 表面活性剂使表面张力下降, 气

泡并聚得到抑制, 平均气泡直径变小, 故气泡在表面活性剂溶液中较清水中上升速度慢。因此, 一定风速下, 溶液中气泡数量增多, 接触面积增大, 这将促进氧传质。但是表面活性剂粘附在气泡周围, 使气液接触界面变得粘滞, 不易于气体扩散, 即增大了液相传质阻力, 故液相氧传质系数  $K_L$  下降。综合起来, 氧传质受到表面活性剂的影响, 即表面活性剂的存在使氧转移系数  $K_{La}$  下降。

表面活性剂较其他污染物质对  $\alpha$  的影响更大, 是由于相比其他污染物质, 表面活性剂更容易抑制气液界面周围的液膜湍动水平, 降低了液体更新速率, 进而增加了液膜传质阻力, 使液膜传质系数降低。故表面活性剂存在条件下的  $\alpha$  较其他污染物质的  $\alpha$  低。

## 2.9 TDS

罗涛等研究了 TDS 含量及表面活性剂对氧传质过程的影响, 当 TDS 的质量浓度在 0~1 g/L 变化时,  $K_{La}$  变化甚微; 当 TDS 的质量浓度从 2 g/L 增加到 8 g/L 时,  $K_{La}$  明显增大; 当 TDS 的质量浓度高于 8 g/L 时,  $K_{La}$  趋于平缓<sup>[46]</sup>。并提出当 TDS 的质量浓度 <8 g/L 时, 可参照美国编写的曝气器清水氧转移测定的标准中 TDS 对  $K_{La}$  的校正<sup>[47]</sup>:

$$K_{La} = K_{La1000} \exp [96.5 \times 10^{-6} (\rho(\text{TDS}) / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) - 1000)]。$$

罗涛分析, TDS 的存在改变了气液界面处的表面张力, 表面张力随无机盐含量线性增大, 欧阳跃军也有类似结论<sup>[48]</sup>。罗涛解释表面张力增大, 气泡并聚可能性降低, 上升速率减小, 促进氧传质过程。Hantz 研究表明  $\alpha$  随 TDS 含量的增大而增大<sup>[49]</sup>。

由此可以看出, TDS 可使  $K_{La}$  增大, 且当 TDS 含量较高时较为明显。但对于其影响机理仍不是很明确, 表面张力是否是 TDS 对  $K_{La}$  影响的主要原因还需进一步研究。

除以上影响因素外, 失活污泥对氧转移过程的影响也有研究<sup>[50]</sup>。范海涛等研究了污泥含量对氧转移过程的影响, 结果表明, 当污泥的质量浓度低于 2 g/L 时, 曝气性能随污泥含量的增大而增强, 在 2~3 g/L 时,  $K_{La}$  达到最大; 当污泥的质量浓度大于 3 g/L 时, 曝气性能随污泥含量增大而降低; 当污泥的质量浓度大于 5 g/L 时, 曝气性能急剧降低。

## 3 $\rho^*_{\infty}$

前面已经提到  $\rho^*_{\infty}$  大小虽与曝气器本身无关, 但其大小可以影响曝气器的充氧能力。因此, 综述  $\rho^*_{\infty}$  的影响因素可为提高曝气器的氧转移速率提供参

考。已知  $\rho_{\infty}^*$  与温度、大气压力等因素有关。此外,实际曝气器充氧过程中  $\rho_{\infty}^*$  也与曝气器浸没深度及水中无机溶解性固体含量有关。

### 3.1 温度

气压一定,水温 0~40 °C 时  $\rho_{\infty}^*$  随温度的降低而增大<sup>[51]</sup>。

同一曝气器在不同水温条件下,由于不同的  $\rho_{\infty}^*$  可能会导致测得的 SOTR 不一样。因此,在比较不同测试水温条件下的曝气器充氧性能时,常将水温 20 °C 作为标准条件,而将其他水温度条件下的 DO 的质量浓度进行校正,引入温度校正因数  $\tau$ <sup>[52]</sup>。

$$\tau = \rho_{s20}^* / \rho_{s\theta}^*$$

式中  $\rho_{s20}^*$  为 20 °C 饱和 DO 的质量浓度 (9.09 mg/L)  $\rho_{s\theta}^*$  为温度  $\theta$  时饱和 DO 的质量浓度。

### 3.2 大气压

由亨利定律可知,在一定温度下,气压越大  $\rho_{\infty}^*$  也越大。大气压对  $\rho_{\infty}^*$  的影响,可以用  $\Omega$  表示:

$$\Omega = \frac{\rho_{\infty20}^*}{\rho_{\infty\theta}^*} \approx \frac{p_b}{p_s}$$

式中,下标 b 表示为测试状态,下标 s 为标准状态下。标准状态下大气压力  $p_s = 101.3$  kPa。

这一近似低于实际值,但在测试水池小于 6 m 水深时较符合<sup>[52]</sup>。气压随海拔升高而降低,高海拔地区的气压可用下式进行估算<sup>[53]</sup>:

$$p_b = p_{b0}(1 - h_a/9100 \text{ m})$$

式中  $p_{b0}$  为海平面处的大气压 (101.3 kPa)  $h_a$  为海拔高度。

### 3.3 总无机溶解性固体含量

总无机溶解性固体 (TDS) 的质量浓度在 0~20 g/L 时, TDS 含量越高, DO 含量越低,其影响可近似视为盐度的影响。同样为比较不同水质条件下测得的曝气器充氧性能,引用  $\beta$  (污水与清水中  $\rho_{\infty}^*$  之比) 说明污水中 TDS 含量对  $\rho_{\infty}^*$  的影响:

$$\beta = 1 - 5.7 \times 10^{-9} \rho(\text{TDS}) / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$$

对于生活污水  $\rho(\text{TDS})$  小于 1.5 g/L  $\beta$  常取 0.99; 对于工业废水  $\rho(\text{TDS})$  为 10 g/L  $\beta$  可低至 0.94<sup>[54]</sup>。

### 3.4 浸没深度

不同类型的曝气器  $\rho_{\infty20}^*$  随浸没深度  $h$  的变化如图 3 所示<sup>[12]</sup>。

由图 3 可看出,随曝气器浸没深度的增大  $\rho_{\infty20}^*$  逐渐增大。在标准条件下 (20 °C, 0.1 MPa), 扩散曝气器浸没深度对  $\rho_{\infty20}^*$  的影响  $\delta$ :

$$\delta = \rho_{\infty20}^* / \rho_{s20}^*$$

式中  $\rho_{\infty20}^*$  和  $\rho_{s20}^*$  分别为 20 °C 时,液体表面处和

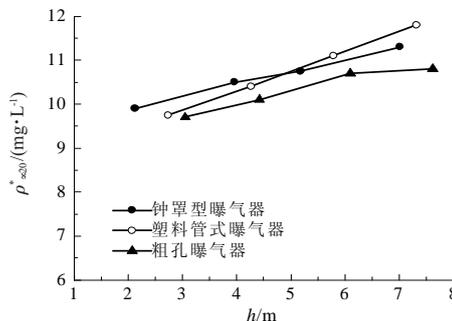


图 3 曝气器浸没深度对  $\rho_{\infty20}^*$  的影响

Fig.3 The effect of diffuser submergence on  $\rho_{\infty20}^*$

曝气器浸没深度处的饱和 DO 质量浓度。

基于 Yunt、Mueller、Saurer 等在清水条件下对微孔曝气器、大气泡曝气器等多种类型的研究, Mueller、Boyle、Popel 拟合得出微孔曝气器和大气泡曝气器的  $\delta$ , 其中微孔曝气器  $\delta$  与曝气器浸没水深  $d$  关系<sup>[55-58]</sup>:

$$\delta = 1.00 + 0.03858d / \text{m} \quad (R^2 = 0.95)$$

综上所述,温度、TDS、曝气器浸没深度以及大气压影响了水中的  $\rho_{\infty}^*$ , 即影响了氧传质推动力,从而影响了曝气器充氧性能。此外,在测定工艺条件下微孔曝气器充氧性能时,为比较不同测试条件下曝气器的性能,应根据下式计算工艺条件下的饱和 DO 质量浓度  $\rho_{\infty f}^*$ :

$$\rho_{\infty f}^* = \tau \Omega \rho_{\infty20}^*$$

$$\rho_{\infty20}^* = \delta \rho_{s20}^*$$

## 4 结语与展望

曝气器充氧过程中的重要参数饱和溶解氧质量浓度  $\rho_{\infty}^*$  的影响因素,即温度、压力、TDS 含量以及曝气器浸没深度影响研究已十分明确。温度越低,压力越大  $\rho_{\infty}^*$  也越大。其次,增加曝气器浸没水深可使  $\rho_{\infty}^*$  增大。 $\rho_{\infty}^*$  的增大,可以提高曝气器的充氧能力。

综合以上影响微孔曝气器充氧性能,氧总转移系数  $K_L a$  的因素,可以看出,在一定范围内增大池表面积、通气量以及施加水平流均可提高  $K_L a$ ,微孔曝气器采用均匀布置方式及增大曝气器浸没水深将有利于氧传质,提高氧转移效率,适当延长污泥龄有利于表面活性剂等污染物质的降解,从而提高氧转移效率;TDS 的质量浓度超过 2 g/L  $K_L a$  将明显增大。但曝气器浸没深度、曝气器密度和 TDS 含量对微孔曝气器充氧性能的影响仍需进一步研究,主要表现在:

对于曝气器浸没深度的影响。一般曝气池水深 2.5~4.5 m 时  $K_L a$  随浸没深度的增大而降低,也有文献表明,在 2~4 m 时  $K_L a$  随水深逐渐降低,但在 6~8 m 时  $K_L a$  逐渐增大。关于  $K_L a$  随水深变化的国内

外研究并不多,其变化规律仍存在争议,影响机理也并不明确。

曝气器密度对微孔曝气器充氧性能的影响。国内外研究的大多是曝气器密度对氧转移效率的影响,并没有指明曝气器密度对  $K_{La}$  的影响。研究表明,曝气器的氧转移效率 SOTE,在一定范围内随曝气器密度的增大而增大,但是否呈线性需进一步验证。对于是否存在最优值,使曝气器密度达到最优值后,氧转移效率变化不明显的结论也尚未有论证。

研究表明,污水中的 TDS 含量增大了表面张力,进而增大了  $K_{La}$ 。这与表面活性剂的影响解释相矛盾,表面活性剂的添加是使表面张力下降,气泡直径减小,界面面积增大,  $K_{La}$  增大。由此看来, TDS 含量对  $K_{La}$  影响是否主要受表面张力的影响还有待研究。表面张力的增大是否有利于界面面积的增大,从而导致  $K_{La}$  增大,需进一步验证。

#### 参考文献:

- [1] 施汉昌. 污水处理技术的研究与发展[J]. 给水排水, 2013, 39(2): 1-3.
- [2] 王洪臣. 微孔曝气系统的理论与工程实践[J]. 市政技术, 1997(1): 30-37.
- [3] Reardon D J. Turning down the power[J]. Civ Eng., 1995, 65(8): 54-56.
- [4] 宋连朋, 魏连雨, 赵乐军, 等. 我国城镇污水处理厂建设运行现状及存在问题分析[J]. 给水排水, 2013, 39(3): 39-44.
- [5] 金昌权, 汪诚文. 污水处理厂能耗分析[J]. 建设科技, 2009(3): 54-55.
- [6] D Rosso, L E Larson, M K Stenstrom. Surfactant effects on alpha factors in full-scale wastewater aeration systems[J]. Water Science and Technology, 2006, 54(10): 143-153.
- [7] Mogens Henze, Mark C K van Loosdrecht, George A Ekama, et al. 污水生物处理——原理、设计与模拟[M]. 施汉昌, 胡志荣, 周军, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [8] Brooks W Newbry. Oxygen-transfer efficiency of fine-pore diffused aeration systems: energy intensity as a unifying evaluation parameter [J]. Water Environment Research, 1998, 70(3): 323-333.
- [9] 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.
- [10] 吴媛媛, 周小红, 施汉昌, 等. 污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 194-197.
- [11] Martin R Wagner, H Johannes Pöpel. Oxygen transfer and aeration efficiency-influence of diffuser submergence, diffuser density, and blower type[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(3): 1-6.
- [12] Water Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH. Fine pore (fine bubble) aeration system: summary report[EB/OL]. (1985-10-12) [2013-06-25]. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=30004EIZ.txt>.
- [13] 汤利华, 孟广耀. 水深对曝气过程中氧总转移系数的影响[J]. 同济大学学报, 2007, 35(6): 760-763.
- [14] 俞庭康, 曹瑞钰. 橡胶膜曝气器充氧性能与水深关系的研究[J]. 给水排水, 2001, 27(2): 17-20.
- [15] 冯俊生, 万玉山. 鼓风曝气充氧性能与曝气器水深关系[J]. 环境工程, 2007, 25(1): 19-21.
- [16] Kenneth I Ashley, Kenneth J Hall. Factors influencing oxygen transfer in fine pore diffused aeration[J]. Water Research, 1991, 25(12): 1479-1486.
- [17] Paulson W L. Oxygen absorption efficiency study-Norton Co. dome diffusers[R]. Worcester: Report to Norton Co., 1976.
- [18] American Society of Civil Engineers et al. Design Manual: Fine pore aeration systems[EB/OL]. (1989-06-07) [2013-06-22]. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=3000464S.txt>.
- [19] Huibregtse G L. Factors affecting fine bubble diffused aeration[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1983, 55(8): 1057-1064.
- [20] Neilson B J. Reaeration dynamics of reservoir destratification[J]. Journal (American Water Works Association), 1974, 66(10): 617-620.
- [21] James A Mueller, William C Bovle, H Johannes Pöpel. Aeration: principle and practice[M]. New York: CRC Press, 2002.
- [22] Hurd C H. Design features of the Indianapolis activated sludge plant [J]. Engineering News Record, 1991, 7: 259-260.
- [23] Ernest L A. Case history report on Milwaukee ceramic plate aeration facilities[EB/OL]. (1994-08-02) [2013-06-26]. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=3000369W.txt>.
- [24] Leary R D. Full scale oxygen transfer studies of seven diffuser systems [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1969, 41(3): 459-473.
- [25] Downing A L. Aeration and biological oxidation in the activated sludge process[C]. Brighton: The Institute of Sewage Purification Conference, 1961.
- [26] Markus Gresch, Martin Armbruster. Effect of aeration patterns on the flow field in wastewater aeration tanks[J]. Water Research, 2010, 45(2): 810-818.
- [27] Bewtra J K, Nicholas W R. Oxygenation from diffused air in aeration tanks [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1964, 36(10): 1195-1224.
- [28] Dasilva Deronzier G. Influence of a horizontal flow on the performance of a fine bubble diffused air system[J]. Water Science and Technology, 1994, 30(4): 89-96.
- [29] S Gillot, S Capela, A Heduit. Effect of horizontal flow on oxygen transfer in clean water and in clean water with surfactants[J]. Water Research, 2000, 34(2): 678-683.
- [30] Capela S. Influence des facteurs de conception et des conditions de fonctionnement des stations d'épuration en boues activées sur le transfert d'oxygène[D]. France: CEMAGREF Antony, 1999.
- [31] Stephanie Vermande. Impact of agitation and aeration on hydraulics and oxygen transfer in an aeration ditch: Local and global measurements [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 62(9): 2545-2555.
- [32] 李小冬, 齐鲁, 刘国华, 等. 通气量对微孔曝气充氧性能影响的中试研究[J]. 中国给水排水, 2014, 50(5).
- [33] Maryam Asgharpour. Effect of surface contaminants on oxygen transfer in bubble column reactors[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 49: 351-360.
- [34] Pisut Painmanakul, Gilles Hebrard. Effect of different contaminants on the  $\alpha$ -factor: local experimental method and modeling[J]. Chemical

- Engineering Research and Design,2008,86:1207-1215.
- [35] S Gillot, A Heduit. Prediction of alpha factor values for fine pore aeration systems[J]. Water Science and Technology,2008,57(8):1265-1269.
- [36] D Rosso, R Iranpour, M K Stenstrom. Fifteen years of off gas transfer efficiency measurements on fine-pore aerators: key role of sludge age and normalized air flux[J]. Water Environment Research,2005,77(3): 266-273.
- [37] Mancy K H, Okun D A. Effect of surface active agents on bubble aeration[J]. Journal (Water Pollution Control Federation),1960,32 (4):351-364.
- [38] 刘星.曝气技术氧传质影响因素的实验研究[D].大连:大连理工大学,2008.
- [39] Eckenfelder W W, Barnhart E L. The effect of organic substances on the transfer of oxygen from air bubbles in water [J]. AIChE Journal, 1961,7(4):631-634.
- [40] Martin Wagner, H Johannes Pöpel. Surface active agents and their influence on oxygen transfer[J]. Water Science Technology,1996,34: 249-256.
- [41] McKeown J J, Okun D A. Effects of surface-active agents on oxygen bubble characteristics[J]. Air Water Pollut.,1963,7:13-122.
- [42] Masutani G, Stenstrom M K. Dynamic surface tension effects on oxygen transfer[J]. Journal of Environment Engineering,1991,117 (1):126-142.
- [43] Maryam Asgharpour, Mohammad Reza Mehrnia. Effect of surface contaminants on oxygen transfer in bubble column reactors[J]. Biochemical Engineering Journal,2010,49:351-360.
- [44] Diego Rosso, Michael K Stenstrom. Surfactant effects on  $\alpha$ -factors in aeration systems[J]. Water Research,2006,40:1397-1404.
- [45] Marupatch Jammongwong, Karine Loubiere, Nicolas Dietrich, et al. Experimental study of oxygen diffusion coefficient in clean water containing salt, glucose or surfactant: consequences on liquid-side mass transfer coefficients [J]. Chemical Engineering Journal,2010, 165:758-768.
- [46] 罗涛,王洪臣,齐鲁,等.总溶解性固体及表面活性剂对微孔曝气氧传质过程影响的中试研究[J].环境科学学报,2012,32(9):2066-2070.
- [47] Michael Stenstrom. Measurement of oxygen transfer in clean water[M]. New York:ASCE,2007.
- [48] 欧阳跃军.无机盐溶液表面张力的影响研究[J].中国科技信息, 2009(22):40-41.
- [49] Hantz P J. Effect of the chemical constituents in water on oxygen transfer[D]. Wisconsin:the University of Wisconsin-Madison,1980.
- [50] 范海涛,王洪臣,齐鲁,等.污泥浓度对微孔曝气氧传质过程的影响 [J].环境工程学报,2012,6(12): 4305-4309.
- [51] 张朝能.水体中饱和和溶解氧的求算方法探讨[J].环境科学研究,1999, 12(2):54-55.
- [52] ASCE 1992 Measurement of oxygen transfer in clean water[S].
- [53] Metcalf and Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Disposal [M]. New York:McGraw Hill,1972.
- [54] ASCE 2001 Measurement of oxygen transfer in clean water[S].
- [55] Yunt F, Hancuff T O. Aeration Equipment Evaluation: Phase I-Clear Water Test Results [EB/OL]. (1988-03-06)[2013-06-08]. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100GGR5.txt?>
- [56] Mueller J A, Kim C, Court N. Ridgewood aeration system analysis, phase I. Coarse bubble sparger system[M]. New York: Frank Burde & Assoc,1982.
- [57] Mueller J A, Saurer P D. Field evaluation of wyss aeration system at Cedar Creek Plant, Nassau County, New York [C]. New York:New York WPCA Conference,1987.
- [58] Mueller J A, Saurer P D, Lagrosa J L. Fine-pore diffuser retrofit at Midgewood, New Jersey[J]. Journal of Environmental Engineering, 1989,115(5):891-909.

## EFFECT FACTORS AFFECTING OXYGEN TRANSFER PERFORMANCE OF FINE BUBBLE DIFFUSERS

Wei Yanling, Qi Lu, Liu Guohua, Wang Hongchen, Li Xiaodong, Zhuang Jian

(School of Environment & Natural Resource, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

**Abstract:** On the basis of two-film theory, researchers have proposed a fundamental equation,  $d\rho/dt=K_La(\rho_{\infty}^*-\rho_L)$ . This paper reviewed the main effect factors on  $K_La$  and  $\rho_{\infty}^*$ , including geometric parameters (e.g. diffuser submergence, diffuser density, surface area, and diffuser layout), operating parameters (horizontal flow, air flow rate, and SRT), and water characteristics (surfactants, and TDS). The reported results revealed that  $K_La$  can be improved by increasing surface area, air flow rate, or applying horizontal flow. In addition, it would also improve oxygen transfer efficiency by using total floor coverage way, or increasing submergence depth of fine bubble diffusers.  $K_La$  will increase evidently when the concentration of TDS was more than 2 g/L. However, some mechanisms about the effects of diffuser submergence, diffuser density, and TDS on oxygen transfer are still unclear. The results about  $\rho_{\infty}^*$  showed that the lower temperature, the greater pressure or the larger water depth, the higher  $\rho_{\infty}^*$ . Increasing  $\rho_{\infty}^*$  allows to the improvement of oxygen transfer rate. Thus, the review for impacts of different aeration parameters on oxygen transfer can provide a reference for optimizing operation in wastewater treatment plants.

**Keywords:** fine bubble air diffuser; oxygen transfer; saturated dissolved oxygen; diffuser density; air flow rate; surfactants

# 以水资源的可持续利用， 保证经济社会的可持续发展