

曝气的原理、计算方式与设备

Zeiss Aerodynamics Co., Ltd.

Building 5 No.6 Suyuan Road Xuanwu District

Nanjing Jiangsu CHINA

Phone +86(025)85766799

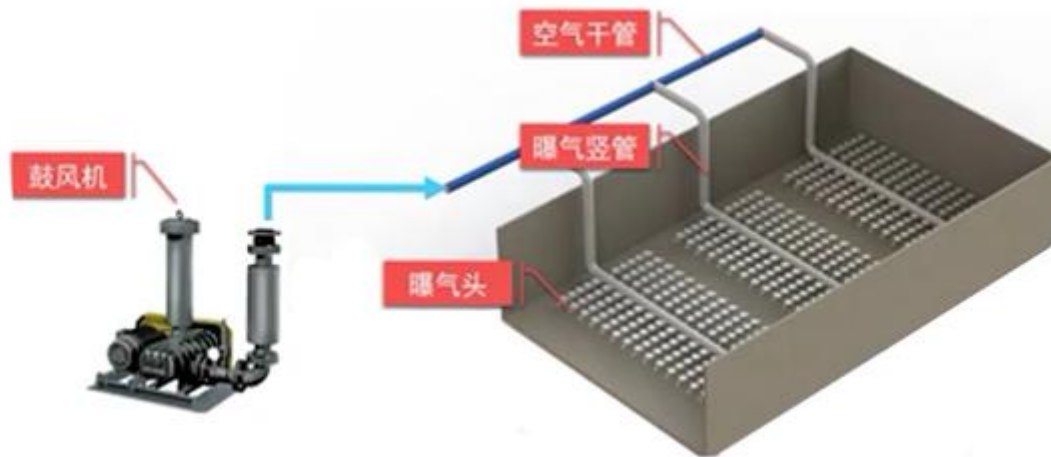
曝气供氧是确保废水好氧生物处理工艺正常运行, 达到预期的处理效果的关键措施之一。今天的内容主讲三个内容, 已经在标题上体现出来了。

曝气的基本概念

在水处理中, 曝气主要有供氧 (向活性污泥中的好氧或兼氧微生物提供充足的溶解氧) 和搅拌 (使活性污泥与废水充分混合, 提高生化反应速率) 两个作用。

常见的曝气方法主要有**鼓风曝气**和**机械曝气**。

下图就是鼓风曝气系统的示意图, 经过预处理后的空气, 经过鼓风机的压缩, 通过空气干管、曝气竖管、曝气直管等, 最终输送到曝气头。



鼓风曝气系统

曝气头通常被安装在曝气池底部，空气通过曝气头被分割成微小的气泡，释放到曝气池的混合液中。微小气泡从池底上升的过程中，其中的氧气会逐渐溶解在混合液中，成为溶解氧，被混合液中的活性微生物利用。

其中曝气头也有不同的形式，下图就是其中常用的一种微孔曝气头：



曝气头

机械曝气，也被称为表面曝气，利用的是安装在水面附近的低速转动的机械设备对水进行曝气，下图就是几种典型的机械曝气设备：



曝气转盘



竖轴式叶轮曝气器



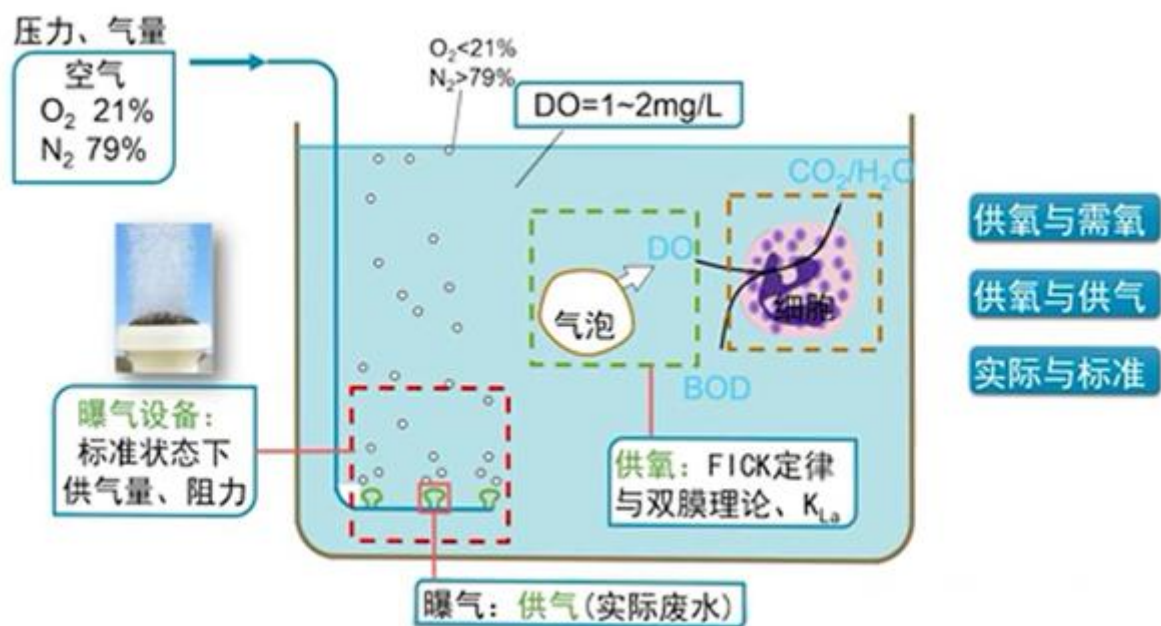
曝气转盘

机械曝气装置

曝气池的基本原理

曝气的过程主要涉及到需氧和供氧、供氧和供气、实际条件下的供氧与标准情况下的供氧这三个关键环节。

下图就是利用风机向活性污泥曝气池中曝气的过程，概括了曝气过程中的三个关键环节：



曝气过程

“需氧”，废水中的污染物需要通过好氧的活性污泥来进行转化或降解。

“供氧”，为了给活性污泥中的微生物提供足够的溶解氧，就需要将空气气泡压入曝气池，使气泡中的氧气溶解到混合液中，成为微生物可以直接利用的溶解氧。

“供气”，曝气中通常采用空气作为氧气的来源，因此还需要计算出为了达到供氧要求，应该“供多少气”。

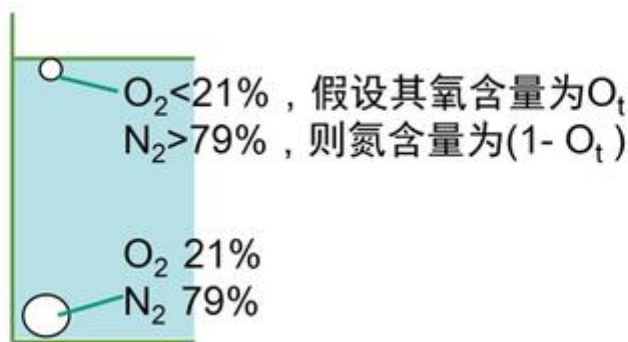
“实际与标准”，实际上，市场上曝气设备的性能指标都是在同一个标准条件下进行测定的，因此如果要保证曝气设备能在我们需要的实际条件下达标，就需要进行“实际条件”向“标准条件”的一个转换。

供氧与需氧

因为供氧的目的就是保证需氧，因此我们假设供氧=需氧，这里的供氧指的是真正通过曝气溶解到水中的氧，因为我们通过风机将空气压入曝气池时，气泡从底部释放出来，在不断上升的过程中，与混合液不断接触，由于氧气在水中的溶解度比较小，所以只有部分氧气会转移到混合液中，另一部分随着气泡浮出水面释放到空气中。

这里就涉及到一个氧气利用效率的问题，或者叫做氧气的转移效率，通常用 EA 表示，指的是通过鼓风曝气系统转移到混合液中的氧量占总供氧量的百分比。

在曝气池底部的空气气泡中，氧气的含量为 21%，氮气的含量为 79%，随着气泡不断上升到曝气池水面，且未离开水面进入大气前，假设气泡中氧气的含量为 O_t ，但其含量为 $(1-O_t)$ 。



我们再假设气泡在一个标准大气压下的体积为 V ，其中的氧气部分转移到水中后，气泡的体积为 V' ，由于氮气没有消耗，因此水中氮气的浓度很快就能达到饱和浓度。根据 EA 的定义及物料平衡，可得如下方程（EA 与 O_t 的关系）：

$$\text{O}_2\text{的平衡} \quad E_A = \frac{0.21V - O_t \cdot V'}{0.21V}$$

$$\text{N}_2\text{的平衡} \quad (1 - O_t) \cdot v' = 0.79v$$

$$E_A = \frac{0.21 - O_t}{0.21(1 - O_t)}$$

$$O_t = \frac{0.21(1 - E_A)}{1 - 0.21E_A} = \frac{0.21(1 - E_A)}{0.79 + 0.21(1 - E_A)}$$

经过简单的计算我们就可以知道：

当 EA 为 20% 时，Ot 约等于 17.5%；当 EA 为 10% 时，Ot 约等于 19.3%；所以说，氧气向水中的转移其实是相当困难的。

实际供氧量与标准供氧量

标准供氧量是曝气设备的一个技术指标，是在一个标准状态下（标准大气压，温度为 20℃，脱氧后的清水）测定得到的。

实际供氧量则是指曝气池在实际运行时所需要的供氧量，这里就需要考虑当地的大气压、曝气头安装水深、实际水温、废水水质等外部条件。

因此，实际状态与标准状态对于气泡中氧气向的传递或溶解，有着很大的差别。

曝气和供气、供氧之间的差别

我们先说一下供氧的理论基础。供氧有时候也成为氧的转移或传递，指的是气泡中的氧气向水中转移或传递。

在曝气的过程中，空气中的氧从气相中被转移或被传递到废水的液相中，是一个氧在气液两相之间的扩散过程，即气相中的氧通过气液界面扩散到液相主体中。可以认为氧的传递实际上是一个扩散过程。

因此，供氧的第一个理论基础，就是扩散过程的基本定律—Fick 定律（不依靠宏观的混合作用发生的传质现象时，描述分子扩散过程中传质通量与浓度梯度之间关系的定律）。

该定律认为，扩散过程的推动力是物质在界面两侧的浓度差，被扩散物质的分子会从浓度高的一侧向浓度低的一侧扩散、转移。下面就是 Fick 定律的一个基本公式：

$$v_d = -D_L \frac{dC}{dy}$$

物质的扩散速率与浓度梯度呈正比关系

- v_d ——物质的扩散速率，即单位时间内单位断面上通过的物质的量；
- D_L ——扩散系数，表示物质在某种介质中的扩散能力，主要取决于扩散物质和介质的特性及温度；
- C ——物质浓度；
- y ——扩散过程的长度；
- $\frac{dC}{dy}$ ——浓度梯度，即单位长度上的浓度变化值。

Fick 定律

从这个公式我们可以看出，该物质的扩散速率与其在这种介质中间的浓度梯度是成正比的。

如果用 M 来表示单位时间 t 内通过界面扩散的物质的量，用 A 来表示这个界面的面积，则扩散速率 Vd 可以用如下公式表示，两个 Vd 代入转化后可得如下公式：

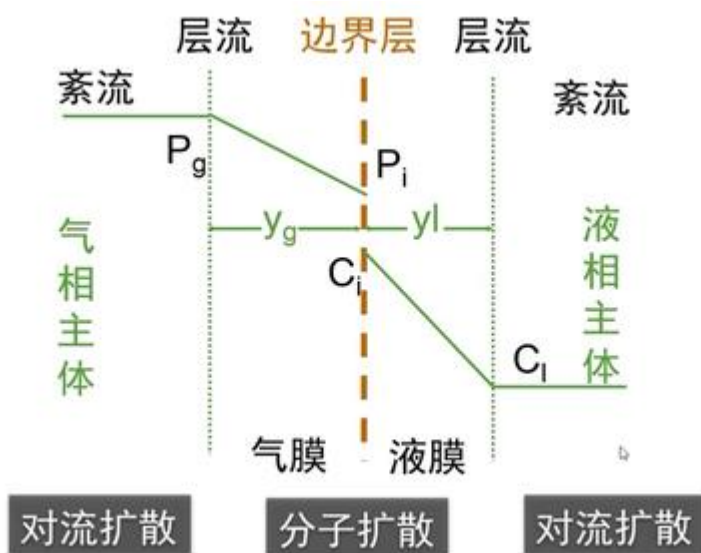
$$v_d = \left(\frac{dM}{dt} \right) / A$$

$$v_d = -D_L \frac{dC}{dy}$$

$$\left. \begin{array}{l} v_d = \left(\frac{dM}{dt} \right) / A \\ v_d = -D_L \frac{dC}{dy} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{dM}{dt} = -D_L A \frac{dC}{dy}$$

然后是供氧的第二个理论基础，对于气泡中的氧向水中传递的这个过程，在 1923 年时候，Lewis 和 Whitman（这俩应该都是美国人）提出了一个“双膜理论”。

如果我们将气泡和曝气池中的混合液分别放大，将气泡看作气相主体，混合液看作液相主体，那么氧的传递过程，就是气相主体中的氧，透过气液交界面两侧的气膜和液膜向液相主体传递的过程。



双膜理论

一旦氧气进入液相主体，那么就成为混合液中的溶解氧。氧在水中的溶解度并不高，可以属于难溶了，所以氧分子扩散的阻力大于对流扩散，传质的阻力主要集中在气膜和液膜上。

在气膜中存在着氧分压梯度，液膜中同样存在着氧浓度梯度，因此就形成了氧转移的推动力。但是通常情况下，我们认为气膜的厚度很小，因此气膜中氧的分压的差也很小，可以认为 $P_g = P_i$ ，“双膜理论”就可以简化为“单膜理

论”，氧转移过程中的传质推动力就可以认为主要是在界面上的饱和溶解氧浓度 C_s 与液相主体中溶解氧浓度 C_l 的差。

如果假设液膜的厚度为 y_l ，那么液膜内溶解氧的浓度梯度就可以用下面的公式表示：

$$\frac{dC}{dy} = \frac{C_s - C_l}{y_l} \quad \frac{dM}{dt} = D_L A \left(\frac{C_s - C_l}{y_l} \right)$$

再假设液相主体的容积为 V ，与上面的公式相除后，就可以得到如下公式：

$$\frac{dM}{dt} / V = \frac{D_L A}{y_l V} \cdot (C_s - C_l) \quad \frac{dC}{dt} = K_L \frac{A}{V} (C_s - C_l)$$

式中：
 $\frac{dC}{dt}$ ——液相主体溶解氧浓度变化速率(或氧转移速率)
 单位： $\text{kgO}_2 / (\text{m}^3 \cdot \text{h})$
 K_L ——液膜中氧分子传质系数 $K_L = D_L / y_l$
 单位： m/h

由于气相界面的面积通常难以计算，所以通常会用氧的总转移系数 K_{La} 来代替公式中的 $K_L (A/V)$ ：

$$\frac{dC}{dt} = K_{La} \cdot (C_s - C_l)$$

K_{La} ——氧总转移系数， h^{-1} ，

$$K_{La} = K_L \frac{A}{V} = \frac{D_L \cdot A}{y_l \cdot V}$$

这里的氧的总转移系数 KLa 的单位是 $1/h$ ，表示的是在曝气过程中，氧的总的传递性。传递过程中的阻力比较大时， KLa 就会比较小，反之亦然。

由上可知，我们可以通过两种方式来提高充氧的效率：

1、提高 KLa 的值，可以通过如下三种措施：

加强液相主体的紊流程度，降低液膜厚度；加速气、液界面的更新；增大气、液解除面积等。2、提高饱和溶解氧 CS 的值，即提高气相中氧气的含量或者氧气的分压，比如说《活性污泥法的运行方式（下）》介绍过的纯氧曝气、深井曝气等。

以纯氧曝气为例，当采用高纯度的氧直接作为气源进行曝气时，纯氧中的氧含量远高于空气中的氧的含量，相应的液相中的饱和溶解氧浓度 CS 也会大幅提高。

以深井曝气为例，虽然仍采用空气作为起源，但采用的是提高空气总压的方式。

曝气系统的计算

影响氧转移速率的主要因素

这里主要涉及到实际供氧量与标准供氧量之间的差别，以及两者之间的转换。

首先介绍两个定义：

标准氧转移速率：在 $20^{\circ}C$ 和一个标准大气压的条件下，在脱氧清水中对某种曝气设备进行充氧速率的测定，这时测得的氧转移速率 R_0 ，就是标准氧转移速率，单位为 kgO_2/h 。

实际氧转移速率：城市废水或工业废水为对象，按当地实际情况（水温，气压等）进行测定，所得到的氧转移速率，通常用 R 表示，单位为 kgO₂/h。

由于实际条件下，废水中的多种因素都可可能对氧的传递产生不利的影响，因此标准氧转移速率与实际之间通常会有较大的差别。对于同一个曝气设备而言，R₀ 通常都会大于 R。下面的就是影响氧转移速率的几个主要因素：

水质	影响氧总转移系数 K_{La}	$K_{Law} = \alpha \cdot K_{La} \quad \alpha = 0.8 \sim 0.85$
	影响饱和溶解氧浓度 C_s	$C_{sw} = \beta \cdot C_s \quad \beta = 0.9 \sim 0.97$
水温	影响氧总转移系数 K_{La}	$K_{La(T)} = K_{La(20)} \times 1.024^{(T-20)}$
	影响饱和溶解氧浓度 C_s	水温升高， C_s 值会下降； 反之，则升高。
气压	影响饱和DO浓度 C_s	$C_{s(P)} = C_{s^0} \cdot \frac{P}{1.013 \times 10^5}$

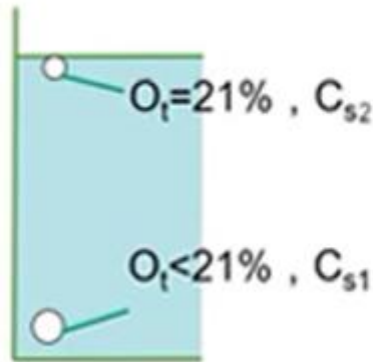
氧转移速率的影响因素

两者之间最大的不同其实就是水质，标准状态下使用的是脱氧后的清水，但实际状态下却是含有多种不同成分，浓度高低不一的废水或污水。不同的水质对曝气的传递过程有着严重的影响，一是降低氧的总转移系数 K_{La} ，二是降低相应条件下的饱和溶解氧浓度 C_s 。

水温也是两者之间的一个影响因素，标准条件下的水温我们通常设定为 20℃，但废水的实际水温就会有很大不同，即便同一个污水厂，不同季节不同时间的水温也可能会有很大的差别。

第三个影响氧转移速率的因素就是气压，气压会影响饱和溶解氧。除了一些高海拔地区，大多数情况下，实际大气压与标准大气压之间的差距并不大。

但是对于鼓风曝气系统，由于其曝气头通常安装在一定深度的水下（约 4~4.5m），因此当空气的气泡刚刚从曝气头中释放出来的时候，虽然气泡中氧气的含量仍与空气中氧含量相等，但是其压力就应该等于当地大气压加上水深所造成的压力之和。



我们假设与其相对应的饱和溶解氧浓度为 C_{s1} ，当这个气泡逐渐上升到水面，在即将离开液面进入大气之前的一瞬间，它的压力与当地的大气压是相等的。但是气泡内氧气的含量，有一部分在上升的过程中溶解到了水中，所以氧气含量已经减少了。因此我们可以得出这样一个结论，就是当气泡从曝气池底部逐渐上升的过程中，气泡压力及氧含量的下降与水深呈线性关系， C_{sm} 就有如下计算公式：

$$C_{s1} = \frac{O_t}{21} \quad C_{s2} = \frac{P_b}{1.013 \times 10^5}$$

$$C_{sm} = \frac{1}{2}(C_{s1} + C_{s2}) = \frac{1}{2}C_s \cdot \left[\frac{O_t}{21} + \frac{P_b}{1.013 \times 10^5} \right]$$

其中 P_b 指的是曝气头安装处的压力， C_{sm} 即为 C_{s1} 与 C_{s2} 的平均值。

氧转移速率的计算

我们再来看一下标准氧转移速率与实际氧转移速率之间的关系。假设在标准大气压下，在一个水池中装有体积为 V 的脱氧清水，通过曝气头进行曝气，通过测试计算出其标准的氧转移速率 R_0 ，由于该清水已脱氧，所以 $C_1=0$ ，可以得到如下公式：

$$R_0 = \frac{dC}{dt} \cdot V = K_{La(20)} \cdot (C_{sm(20)} - C_1) \cdot V = K_{La(20)} \cdot C_{sm(20)} \cdot V$$

在当地水温为 T ，当地大气压为 p 的条件下，如果仍采用上述同样的曝气头，安装在同样水深下，对某种实际废水进行曝气，此时的氧转移速率即为实际氧转移速率 R ，与 R_0 相比， R 需要使用相应的系数进行处理，其公式如下：

$$R = \alpha \cdot K_{La(20)} \cdot 1.024^{(T-20)} \cdot (\beta \cdot \rho \cdot C_{sm(T)} - C_1) \cdot V$$

这里的 C_1 指的是曝气池混合液中的溶解氧浓度（通常为 $1 \sim 2\text{mg/L}$ ）。

最后我们看一下 R_0 与 R 的比值：

$$\frac{R_0}{R} = \frac{C_{sm(20)}}{\alpha \cdot 1.024^{(T-20)} \cdot (\beta \rho C_{sm(T)} - C_1)}$$

一般情况下：

$$R_0/R = 1.3 \sim 1.6$$

$$R/R_0 = 0.63 \sim 0.77$$

因此，我们在设计曝气池的时候，如果已经计算确定了实际的需氧量，或着供氧速率，或者氧转移速率 R ，就可以计算出标准条件下的供氧速率 R_0 ，以 R_0 为基准进行设计选购，这样多出来的余量也可以保证在日常的运行过程中保证供氧的要求。

供氧量的计算

为了正确的选择风机，还需要在得到标准供氧速率的基础上，计算出具体的供气量。这里就涉及到另一个定义，氧转移效率 EA：指的是在标准状态下通过鼓风曝气系统转移到混合液中的氧占总供氧量的百分比。

$$E_A = \frac{R_0}{O_c} \quad E_A = \frac{21 - O_t}{21(1 - O_t)}$$

式中：E_A —— 氧转移效率，一般以百分比表示

O_c —— 供氧量，kgO₂/h

假设通过风机空气管道和曝气头向水中供入的总氧量为 OC（单位 kgO₂/h），使用 GS（单位 m³/h）来表示风机的供气量，可得 OC 与 GS 的关系如下：

$$O_c = G_s \times 21\% \times 1.331 = 0.28G_s$$

21% —— 氧在空气中的百分比

1.331 —— 20℃时氧的容重，kg/m³

G_s —— 供气量，m³/h

最后就可以得到 GS 的计算公式：

$$G_s = \frac{R_0}{0.28 \times E_A}$$

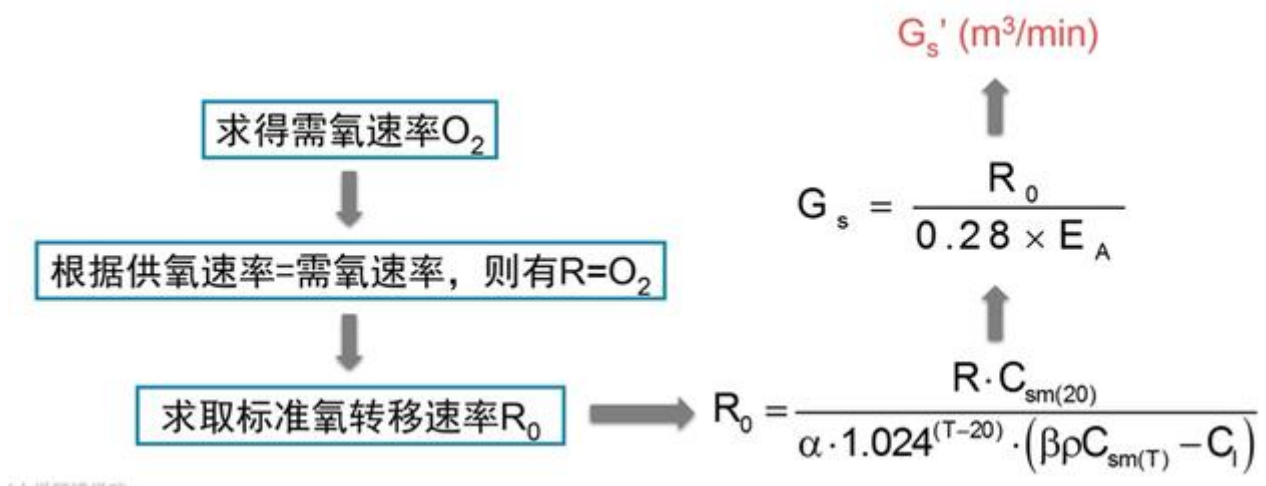
这里再说一点，上面关于供气量计算的是鼓风曝气系统，对于机械曝气而言，其曝气设备通常安装在水面附近，一般也无法计算它的供气量，因此一般通过公式计算出实际供氧量 R₀（也叫做充氧能力），设备厂家也会向用户提供其设备在标准状态下的充氧能力，以此来选型。R₀ 的计算公式如下：

$$R_0 = \frac{R \cdot C_{s(20)}}{\alpha \cdot 1.024^{(T-20)} \cdot (\beta \rho C_{s(T)} - C_l)}$$

曝气系统设计的一般程序

首先是鼓风机曝气系统：

求风量 G_s (供气量)

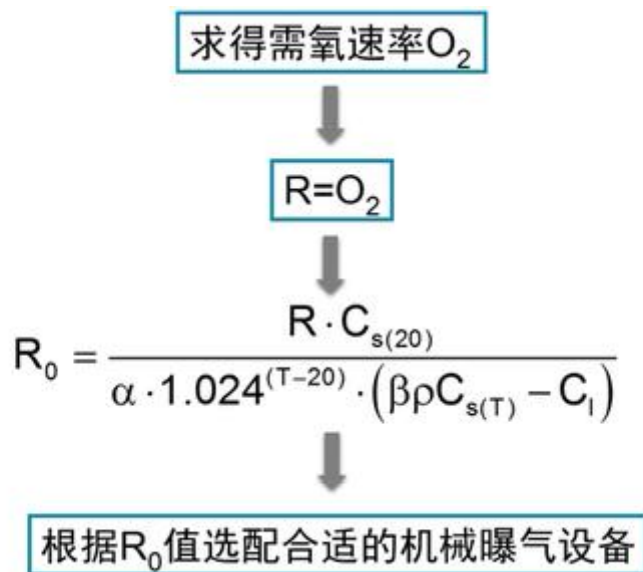


求风压 (风机出口风压)

根据管路系统的沿程阻力、局部阻力、静水压力再加上一定的余量, 得到所需求的最小风压。

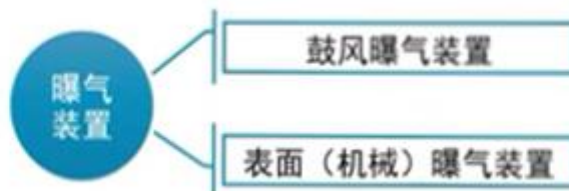
根据风量与风压选择合适的风机。

对于机械曝气系统而言则是要计算充氧能力 R_0 ：



常用的曝气设备

曝气装置又称为空气扩散装置，是活性污泥处理系统的主要设备，其分类如下：



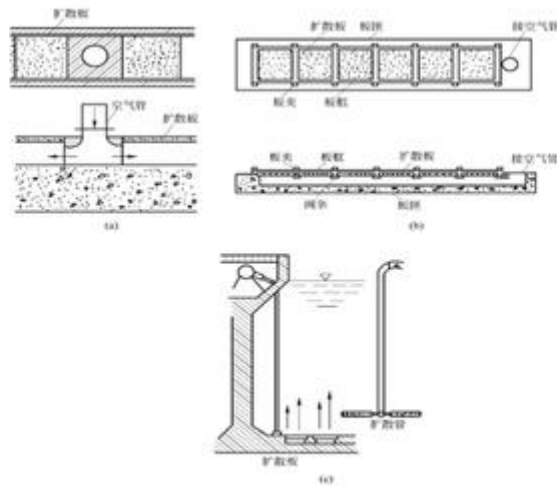
对于曝气设备，通常用三个指标来衡量其技术性能：

氧的利用率 EA：通过鼓风曝气系统转移到混合液中的氧量占总供氧量的百分比，也称为氧转移效率。充氧能力 R0：通过表面机械曝气装置在单位时间内转移到混合液中的氧量，单位是 kgO₂/h。动力效率 Ep：每消耗 1kW·h，能够转移到混合液中的氧气的量，单位是 kgO₂/ (kW·h) 。**鼓风曝气装置**

鼓风曝气系统主要由鼓风机、空气输送管道和曝气装置组成。主要有一下几种分类：

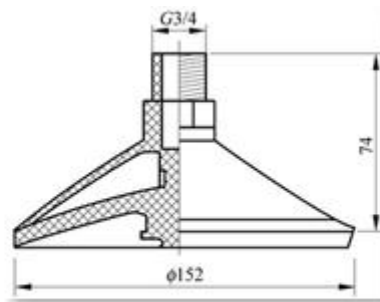
(微) 小气泡型；

中气泡型；大气泡型；水力剪切型；水力冲击型。在活性污泥系统的曝气池中，使用最多的就是（微）小气泡型，也就是微孔曝气头。如下图就是常见的几类曝气头：



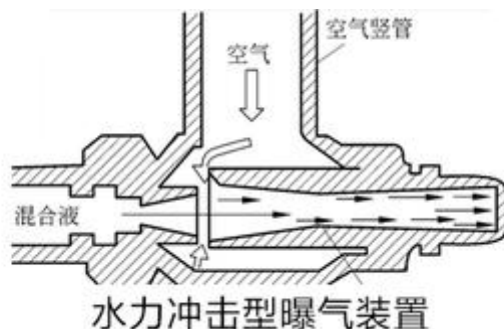
小气泡型曝气装置

小气泡型曝气装置



水力剪切型曝气装置

水力剪切型曝气装置



水力冲击型曝气装置

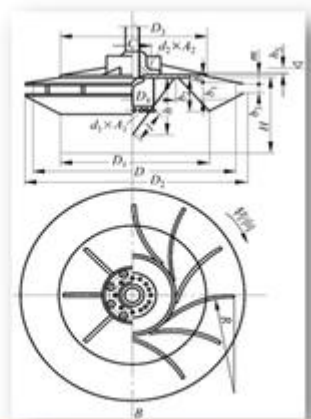
机械曝气装置

前面我们也提到过，机械曝气的原理与鼓风曝气的原理存在一定的差别，机械曝气的原理可以简单的概括为以下三个环节：

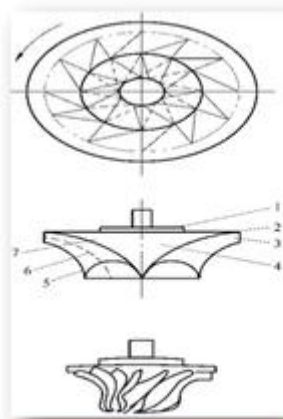
水跃：曝气机转动时，表面的混合液不断地从周边被抛向四周，形成水跃，液面被强烈搅动而卷入空气。提升：曝气机具有提升作用，使混合液连续的上下循环流动，不断更新气液的接触面，强化气、液的接触。负压吸入：曝气器转动的时候会在一定的部位形成负压区域，从而吸入空气，加强空气与混合液的接触，促进供氧。机械曝气装置的主要分为竖轴式表面曝气装置和横轴式表面曝气装置。

竖轴式表面曝气装置主要有以下 4 个类型：

泵型叶轮曝气器；K 型叶轮曝气器；倒伞型叶轮曝气器；平板型叶轮曝气器。



泵型叶轮曝气器



K型叶轮曝气器

横轴式表面曝气装置主要分为曝气转刷和曝气转盘两种类型，主要适用于氧化沟工艺，具有调节方便、维护简易、动力效率较高等优点。

