

射流曝气装置在纺织工业废水处理中的应用

顾鼎言

(湖北省一轻工业研究所)

【提要】 本文阐述了射流曝气装置在纺织工业废水处理中的应用, 如射流搅拌调节池、射流泡沫分离池、射流曝气池、射流污泥浮上分离池等, 还介绍了射流曝气器的构造、设计理论和计算方法。

一、射流曝气装置应用概况

纺织工业所产生的废水, 大部分是有机污染物和化学药剂, 国内外大都采用生物化学处理。在处理的构筑物中, 近年来我国已引进射流曝气装置用作气液搅拌、气液交换(充氧)、浮上分离。国外应用射流曝气规模较大的首推西德拜耳公司。该公司有一个用于日处理量为2.4万吨、BOD值为1000毫克/升的射流曝气活性污泥处理场, 运行正常, 处理效果很好, 活性污泥的沉降性能也很好。他们认为射流曝气比较适用于高浓度污水处理。另外, 美国的克拉克公司在麻省的联合企业和另一家公司的威斯康星纸厂, 用射流曝气装置处理造纸废水, 均取得了良好效果。我国于1974年开始, 已将射流曝气装置应用于印染废水处理, 获得成功, 至今已有七家印染厂采用此法, 投产数年, 效果较好。

纺织业生产废水的处理, 一般有代表性的流程如下:

废水→脱泡池(或除油池)→调节池→生化处理池→二次沉淀池(或污泥浮上池)→化学处理浮上池(或活性炭吸附池)→排放或回用

在上述流程的调节池、脱泡池、曝气池、污泥浮上池、化学浮上池中, 均可根据情况个别采用液气射流装置, 简述如下。

二、射流调节池

在调节池中装设若干射流曝气器, 利用从集水井中抽吸废水的提升水泵作为射流曝气器的工作水泵, 这台水泵既起到提升废水的作用, 又起到预充氧的作用。中、小水量的调节池可建成圆形, 射流曝气器尾管插入池底, 出水沿切线方向导流, 使水在池中旋流上升, 较快的向全池混合, 起到水力搅拌的作用, 提高调节池的匀质效果。具有还原性化学物质的废水, 通过射流曝气之后, 可以去除部分化学耗氧物质, 消除 COD_{Cr} 量可达10~30%。水力搅拌的结果, 不使悬浮物下沉, 可防止沉渣的腐化和排渣的困难。射流调节池示意图见图1。

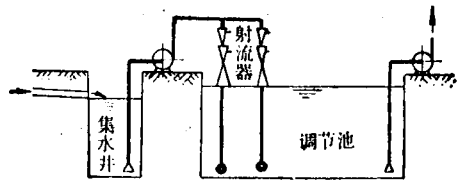


图1 射流调节池示意图

三、射流泡沫吹脱池

泡沫吹脱池主要消除废水中的合成洗涤剂 and 表面活性剂等易发泡的污染质, 这些物质可生化降解的性能很低, 而 COD_{Cr} 值却比较高, 在生化过程中会产生大量泡沫, 影响处理设备的正常运行。如进行泡沫吹脱处理,

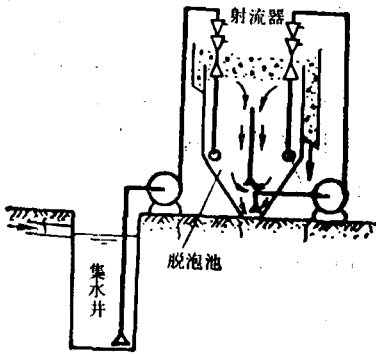


图2 射流泡沫吹脱池示意图

可去除 COD_{Cr} 量的 10~20%。射流泡沫吹脱池示意图 2。

图中是利用集水井的提升水泵作为射流器的工作水泵，必要时也可在脱泡池外设循环水泵。

通过射流脱泡，不但起到去除泡沫作用，同时起到预充氧以消除还原性物质和增加水中的溶解氧的作用。小水量的工厂，脱泡池可与调节池合建在一起。

四、射流曝气池

射流曝气活性污泥法是污水生物处理的一种新的处理系统，在曝气池内设若干射流曝气器，利用投配污水的水泵和二沉池的回流污泥泵作为射流曝气器的工作水泵。需要时也可在曝气池中设循环水泵作为射流曝气器的工作水泵。

射流曝气机组由污水泵、射流曝气器、

供水管和排水尾管等组成。射流曝气工作原理是：压力水通过喷嘴高速喷射，由于射流边界层与气体间的粘滞作用把空气吸入，因射流与空气的相互作用和喷嘴表面粗糙度等影响，使射流表面呈波状。随着这种表面波的发展，导致射流破裂而成为滴状液体，液滴以高速冲撞压缩空气，形成微小气泡，此时液滴重新聚合成为含气泡的乳状混合液。混合液进入扩散管后，由于流速减小，压力增加，气泡受到进一步压缩，最后通过排水尾管进入曝气池。在上述过程中，一方面由于空气被粉碎成小气泡并受到压缩，使空气中的氧转移到液体中去；另一方面，活性污泥被射流剪切成小颗粒，增加了它与空气的接触面积；活性污泥还可以从气泡中直接吸氧，从而提高了氧的利用率。

射流曝气池还具有如下特点：

1. 由于活性污泥经喷射粉碎，可提高活性污泥的活性，处理效果比普通活性污泥法有所提高。

2. 可防止球衣细菌的丝状膨胀。射流曝气过程造成不利于球衣细菌的生长条件，丝状体经射流破碎，镜检中发现丝状菌碎块，并存在大量个体球衣细菌。

3. 在与普通活性污泥法相同的运行条件下，剩余污泥比常规活性污泥法减少 30% 左右，因为部分剩余污泥在射流过程中溶解于水，被生物降解消除。射流曝气活性污泥处理系统见图 3。

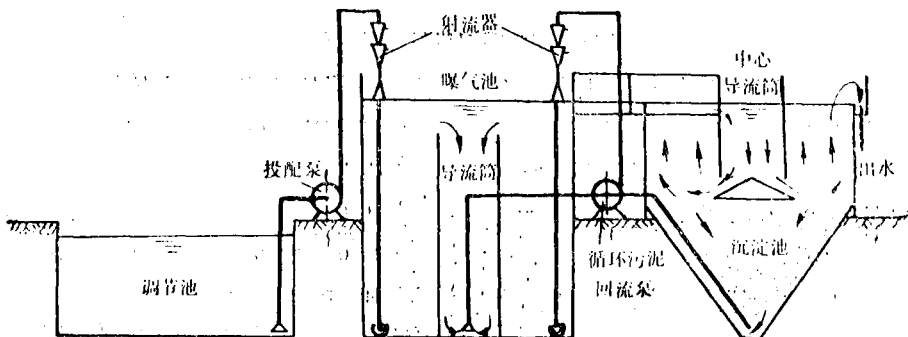


图3 射流曝气活性污泥处理系统

五、射流污泥上浮分离池

活性污泥或化学凝聚污泥的分离浓缩，一般均用重力沉降。由于沉淀池要求低流速，因此必须建造较大面积的池子。当活性污泥发生膨胀时，污泥沉淀性能极差，更使出水水质恶化。污泥浓缩池也要求有较长的浓缩时间，一般要10小时以上。如利用上浮分离法，可取得较好的分离和浓缩效果。

上浮分离污泥是利用附着于污泥中的许多微气泡的浮力，使污泥浮升到液体表面，形成浆状，可刮除以达到泥水分离的目的。气泡的大小必须在 $50\sim 100\mu$ 之间。

上浮分离法一般用空气压缩机作为气源，气体在高压下溶解于水，溶气水通过突然减压释放，使溶入水中的气体成为 $50\sim 100\mu$ 的微气泡从液体中分离出来，使固体颗粒粘附上升。由于空气压缩机噪声大，震动大，造成环境的二次污染，因而改用液气射流泵，利用高压水造成的高流速吸引空气，同样进溶气罐制取溶气水。其处理工艺见图4。

也可以将液体直接通过液气射流泵形成

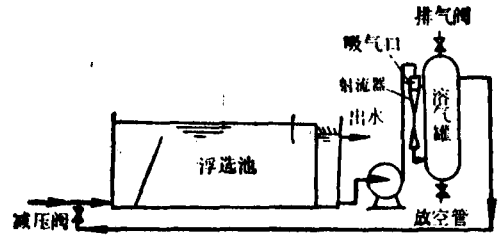


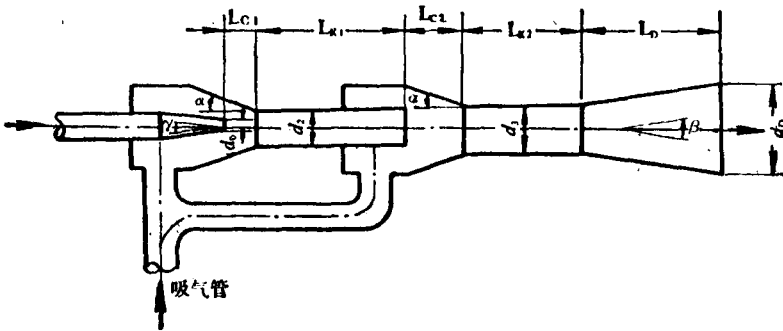
图4 射流溶气上浮分离池示意图

微细气泡作为上浮分离气泡，但是必须控制好气泡的均匀度，要避免混入少量大气泡后搅动上浮层。

六、射流曝气器的构造

射流曝气器有自吸式和压入式两种，自吸式是由工作水的喷射使吸入室造成真空而吸引空气，压入式是在吸气口处吹进空气，本文介绍自吸式射流曝气器的设计。自吸式射流曝气器又有单喷嘴单级、单喷嘴双级以及多喷嘴等几种，下面重点阐述单喷嘴双级射流曝气器。

射流曝气器是由喷嘴、吸入室、喉管入口、喉管、扩散管组成，见图5。



- L_{c1} —一级喉嘴距；
- L_{K1} —一级喉管长；
- L_{c2} —二级喉嘴距；
- L_{K2} —二级喉管长；
- L_D —扩散管长；
- α —收缩半角；
- β —扩散角；
- γ —喷嘴锥角；
- d_0 —喷嘴直径；
- d_1 —一级喉管直径；
- d_2 —二级喉管直径；
- d_D —扩散管直径。

图5 单喷嘴双级射流曝气器

1. 喷嘴：一般用收缩圆锥形，也有用流线型和孔板的。出口断面有一直线段，其长度为 $0.25d_0$ 。（ d_0 为喷嘴直径），这样可使射流在喷嘴出口处保持一定方向，防止发生散射。喷嘴锥角以 $13^\circ 30'$ 为佳。

2. 喉管入口：采用收缩圆锥形，收缩半角为 $8\sim 20^\circ$ 。

3. 喉嘴距：与喉嘴面积比有关。它对射

流曝气器的性能有较大的影响，其优值如下。

面积比(m)	喉嘴距(Lc)
1.5~3.0	$(0.1\sim 0.5)d_0$
4.0~6.0	$(1\sim 2.5)d_0$
7.0~25.0	$(1\sim 9)d_0$

4. 喉管：长度过短时，由于速度分布不均匀，气液不能充分混合，使扩散损失增加。长度过长将增加摩擦损失。试验证明，其最

优长度是 $L_K = (6 \sim 7)d_0$ 。

5. 扩散管：其作用是把喉管出口处的动能转变为压能。一般采用均匀扩散，扩散角采用 $5 \sim 7^\circ$ ，当扩散角为 7° 时，扩散管长为 $L_D = 7(d_D - d_3)$ 。

七、射流曝气器设计计算

在射流曝气器内，污水、空气和活性污泥之间进行能量交换和质量传递，运动过程非常复杂。根据射流泵理论和曝气机组的特点，可得出如下的设计理论和计算方法。

设计计算中，主要利用由流体力学的连续定理、动量和能量守恒定律推导出射流曝气器的基本方程、最优参数方程、临界与极限状态方程和装置性能方程。其中前三个方程是计算射流曝气器的压力、流量和几何尺寸时采用比值(无因次参数)表示。这是因为同一射流泵，由于工作水压力和流量不同，可以有不同的吸气量和出口压力，而它们的比值即压力比、流量比是不变的。不同尺寸的射流器，只要几何相似(面积比不相同)，雷诺数相近，就具有相似的性能。采用无因次参数对射流泵性能进行概括，可简化计算工作量。

1. 主要无因次参数

流量比： $q = Q_s / Q_0 =$ 空气体积流量 / 工作液体流量

$$q_1 = Q_{s1} / Q_0; \quad q_2 = Q_{s2} / Q_0$$

压力比： $h = (P_C - P_s) / (P_0 - P_s) =$ 射流曝气器压力 / 工作压力

面积比： $m = f_3 / f_1, \quad m_1 = f_2 / f_1, \quad m_2 = f_3 / f_2, \quad m_c = f_c / f_1$

式中： Q_{s1} 、 Q_{s2} 分别为一级及二级喉管吸入气体体积流量； P_C ——射流曝气器出口压力， P_s ——吸气口压力； P_0 ——喷嘴处工作压力； f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_c 分别为喷嘴出口、一级、二级喉管、扩散管出口的断面积。

2. 最优参数方程

使射流曝气装置效率最高的工作参数

h_v 、 q_v 及几何参数 m_v 称为最优参数(方程略)。由于该方程很繁琐，为了使其实用化，特经过计算绘制成曲线如图 6 以供查找。

图中： m_v ——最优面积比； q_v ——最优流量比； h_v ——最优压力比。

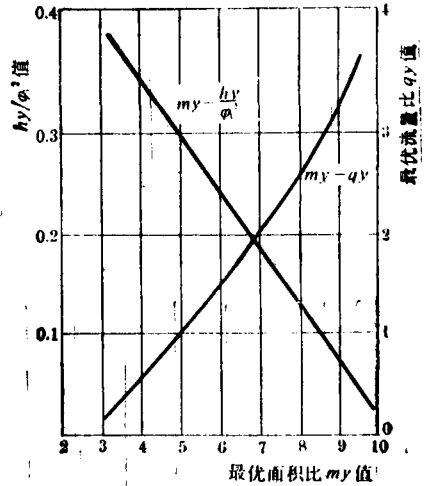


图 6 $m_v - q_v$ 、 $m_v - h_v / \phi^2$ 曲线

3. 临界状态方程

当曝气器出口压力 P_C 增加到一定数值时，混合区被压缩到靠近入口处，使该处的压力突然升高。这时喉管内产生混合冲击波，使射流器工作性能不稳定，吸气口处产生脉动的返水现象。这时相应的流量比及压力比称为临界参数 q_{K1} 、 h_{K1} 。

临界流量比 q_{K1} 的计算：

$$q_{K1} = \phi^2 \left(\frac{P_3}{P_s} \right)^2 \frac{m^2 P_s}{2 \phi_1 P_0}$$

$$P_3 = (b + \sqrt{b^2 - 4C}) / 2$$

$$b = \phi_1^2 P_0 \left[\frac{2 \phi_2'' K_1'' A}{m} - \frac{2(1 + \delta)}{m^2} \right] + P_s$$

$$C = 2 \phi_1^2 P_0 P_s (1 + \delta) q_v / m^2$$

$$A = \phi_2' K_1' m_1 / K_s'$$

要求 $q_{K1} < q_v$ 时为安全。

式中： P_0 ——喷嘴处工作压力； P_s ——吸气口处压力； m ——喉嘴面积比； ϕ_1 ——喷嘴流速系数，取 $0.95 \sim 0.975$ ； ϕ_2' ——扩散管流速系数，见图 7； ϕ_2'' ——二级喉管流速系数，取 0.85 ； ϕ ——与 m 值有关的系数，见图 8；

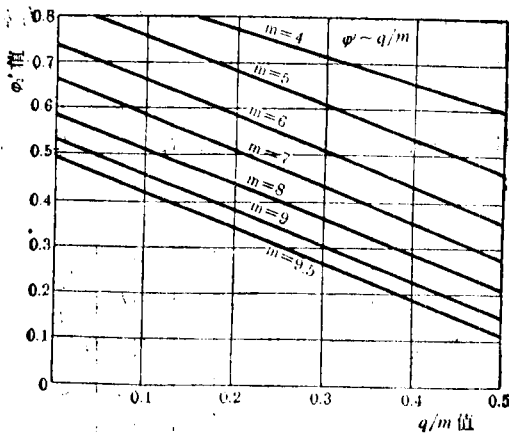


图7 $\phi_2'-q/m$ 曲线

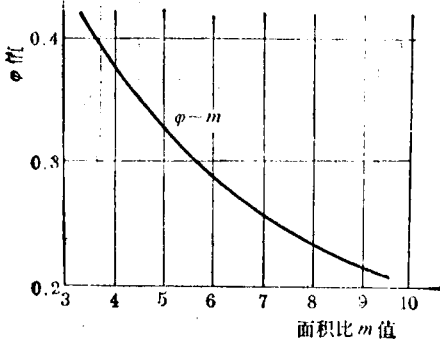


图8 $\phi-m$ 曲线

K_1' ——一级喉管入口处流速分布不均匀动量改正系数, 取 0.9; K_1'' ——二级喉管入口处流速分布不均匀动量改正系数, 取 0.9~0.95; K_2' ——一级喉管出口处流速分布不均匀动量改正系数, 取 1.05; δ ——扩散管入口断面流速分布不均匀动量改正系数, 取 $\delta=0$ 。

4. 极限状态方程

在某一面积比 m 及工作液体压力 P_0 下, 射流曝气器能达到的最大吸气量时的流量比称为极限流量比 q_K 。此时, 一、二级喉管内气流速度达到音速。进气量只与过流面积有关, 与压力无关。

极限流量比 q_K 的计算:

$$q_K = \frac{13.7\mu}{\varphi_1} (m-1) \sqrt{\frac{P_s}{P_0 - P_s}}$$

式中: μ ——系数, 取 0.07~0.075。

要求 $q_K > q_v$ 时为安全。

5. 尺寸计算

喷嘴直径:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q_0}{\pi\varphi_1 \sqrt{2g \frac{P_0 - P_s}{\gamma_0}}}}$$

式中: γ_0 ——液体比重, 取近似值 1;
 g ——重力加速度。

一级喉管直径:

$$d_2 = \sqrt{m_1} d_0 \quad m_1 = m / (2 \sim 3)$$

二级喉管直径: $d_3 = \sqrt{m} d_0$

八、计算例

1. 条件

射流曝气器出口压力 $P_C = 1.10$ 公斤/厘米²(绝对压力), 吸入压力 $P_S = 1.02$ 公斤/厘米²(绝对压力), 工作流量 $Q_T = 45$ 米³/小时。工作水泵选用 2½PW-13KW, $Q_T = 90$ 米³/小时, $H_T = 26$ 米, $N_{\text{轴}} = 11$ 千瓦, 一台泵带 2 只射流曝气器, 安装高度距水面 3.0 米, 水头损失约 1 米。

2. 压力比

$H_0 = 26 - 3 - 1 = 22$ 米(工作压力 $P_0 = 2.2$ 公斤/厘米²)

$$h = \frac{1.10 - 1.0}{2.2} = 0.045$$

$$h/\varphi_1^2 = \frac{0.045}{0.95^2} = 0.0499$$

3. 最优面积比 m_v 和最优流量比 q_v

查图 6 得: $m_v = 9.4$ $q_v = 3.63$

4. 临界流量比 q_{K1}

$q_v/m = 0.357$ 由图 7 查得 $\varphi_2' = 0.205$
 $m_1 = m/3 = 3.1$

$$A = (0.205 \times 0.9 / 1.05) \times 3.1 = 0.545$$

$$b = 0.95^2 \times 2.2 \left[\frac{2 \times 0.85 \times 0.9 \times 0.545}{9.4} \right. + \left. \frac{2(1+0)}{9.4^2} \right] + 1.02 = 1.151$$

$$C = 2 \times 0.95^2 \times 2.2 \times 1.02(1+0) \times 3.63 / 9.4^2 = 0.166$$

$$P_s = (1.151 + \sqrt{1.151^2 - 4 \times 0.166}) / 2$$

$$= 0.981$$

$$q_{K1} = 0.212^2 \left(\frac{0.981}{1.02} \right)^2 \frac{9.4^2 \times 1.02}{2 \times 0.95^2 \times 2.2}$$

$$= 0.941 < q_v(3.63)$$

5. 极限流量比 q_K

$$q_K = \frac{13.7 \times 0.07}{0.95} (9.4 - 1) \sqrt{\frac{1.020}{3.2 - 1.02}}$$

$$= 5.79 > q_v(3.63)$$

6. 尺寸计算

$$\text{喷嘴直径: } d_0 = \sqrt{\frac{4 \times 12.5 \times 10^{-3}}{3.14 \times 0.95 \sqrt{19.6 \times 22}}}$$

$$= 0.028 \text{米 (即 28 毫米)}$$

$$\text{一级喉管直径: } d_2 = \sqrt{3.1} \times 28$$

$$= 40.58 \text{毫米}$$

$$\text{二级喉管直径: } d_3 = \sqrt{9.4} \times 28$$

$$= 85.85 \text{毫米}$$

$$\text{一级喉管长: } L_{K1} = 7 \times 40.58 = 284 \text{毫米}$$

$$\text{二级喉管长: } L_{K2} = 7 \times 85.85 = 600 \text{毫米}$$

$$\text{一级喉嘴距: } L_{C1} = 3 \times 28 = 84 \text{毫米}$$

$$\text{二级喉嘴距: } L_{C2} = 3 \times 40.58 = 121.74$$

$$\text{毫米}$$

$$\text{扩散管长: } L_D = 7(125 + 85.85) = 274$$

毫米