

SBR 法降解有机物规律的研究*

彭永臻 张自杰 董方华 王淑莹

(哈尔滨建筑工程学院市政与环境工程系)

摘 要

本研究是以处理啤酒废水的试验为基础展开的。试验结果进一步验证了 SBR 法具有简易、快速、低耗等优点。除此之外,还得出以下结论:增加间歇反应时起始污泥浓度可以提高处理效率或减少反应时间;非限制曝气方式耐冲击负荷,需氧均匀,能缩短反应周期;间歇反应中微生物细胞的合成代谢占主导地位,对氮与磷的需要量大于传统的理论值。本文还指出 SBR 法是很适合我国国情的一种废水处理工艺,应当加强对它的研究和推广应用。

关键词:间歇反应器 曝气 COD SBR 法

一、概 述

据统计,我国每年要排放 360 多亿吨废水,而经过处理净化的仅占 2.9%,致使 82% 的河流受到不同程度的污染。显然建立区域性的大型城市污水处理厂也是我国水污染控制的必由之路。但是,就我国国情而言,近期内即使仅仅在各大城市建立这样的污水处理厂在资金上也是非常困难的。因此,研究开发一种流程简单、快速、低耗的废水处理工艺是我们当前的一项很紧迫的任务。

从目前的污水好氧生物处理的研究、应用及发展趋势来看,能称得上简易、快速且低耗的污水处理工艺,应当首推间歇式活性污泥法,又称序列间歇式活性污泥法(Sequencing Batch Resctor Activated Sludge Process,缩写为 SBR 法,或简称间歇法)。顾名思义,它是一种按间歇曝气方式来运行的活性污泥法污水处理系统(曝气池停止曝气时兼作二次沉淀池使用)。简单地说,它具有以下优点:

1. 工艺流程简单,不设二次沉池,一般情况也不设调整节池,可节省相应的基建费;
2. 不需回流污泥,省去了回流污泥的设备费与动行费;
3. 间歇曝气过程对于时间来说是一种理想的推流式反应,其反应推动力大,比有机物降解速率大、效率高,因此,可以减少曝气池有效容积与曝气时间,降低基建费与运行费;
4. 间歇曝气具有抑制丝状菌生长繁殖的优点是被公认的,它与其它活性污泥法相比最不易发生污泥膨胀,而且其污泥指数 SVI 较低,有利于活性污泥的沉淀和浓缩;
5. SBR 法(或称间歇法)运行过程本身就是一个好氧-厌氧的交替过程,能够产生在单一的曝气池内实现脱氮脱磷。此外, SBR 法更适于不连续排放的工业废水与小城镇的污水处理,通过灵活调节运行周期和时间,来节省运行费。

SBR 法的最大缺点是运行管理比较繁琐,但是在污水处理厂自动控制与监测,特别是电子计算机的应用不断发展的今天,这一缺点已不能制约 SBR 法的进一步开发与应

* 国家自然科学基金资助项目

用了。80 年代初以来,美国、日本、西欧、澳大利亚等国相继进行了广泛研究,并改建与新建了许多 SBR 法污水处理厂^[1-3]。1984—1985 年,美国环保局与日本下水道理事会分别通过了对间歇式活性污泥法的技术评价报告书,充分肯定其特有的优点。

国内对 SBR 法的研究与应用,虽然可以说已经开始起步了^[4-6],但并没引起足够的重视。我们认为,针对我国的情况,应当大大加强这方面的研究与开发。啤酒工业废水的水量较大,有机物浓度高,是一项不可忽视的污染源,但它又属易降解的有机废水,应当是首先治理的对象。根据近年来我国啤酒工业发展快,厂家数量多分布广等特点,采用间歇式活性污泥法是适宜的。为此,我们通过 SBR 法降解啤酒废水来对该工艺的特点和性能进行深入研究。

二、试验设备与方法

由于 SBR 法工艺流程简单,不需二沉池与回流污泥设备等,其小型试验流程及设备也很简单。本试验采用有机玻璃制成的圆柱型的间歇反应器来作为曝气池兼作二沉池,容积为 14.31,高为 1.0m,直径为 0.135m。在其底部安装圆盘式空气扩散板,压缩空气经过保持恒压的贮气罐通过扩散板曝气,起到充氧与混合搅拌作用。反应器的一侧沿纵向设置了 10 个排放取样口,以供取样分析,排水与排泥用。为了使试验在同一环境条件下进行,用温度控制仪来控制反应器内恒温为 20℃,曝气运行时反应器内的溶解氧浓度始终维持 2mg/l 左右(脱氮试验除外)。其它附属设备有配水箱、初沉池、水泵、空压机、贮气罐、温控仪、DO 仪等。

在间歇反应器曝气运行时,逐时测定 COD_Cr 、 BOD_5 (以下分别简写成 COD 和 BOD),有机氮 org-N 、氨氮 NH_4^+-N (含 NH_3-N)、硝酸及亚硝酸盐氮 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、总磷 Pt 与 MLSS 与 MLVSS 等指标的变化情况,以考察间歇法的净化功能及各种生化反应特性。经大量的测定分析发现,随着间歇曝气时间的增加,BOD/COD 的值逐渐减少,但它们之间总有一定的规律。加上在短时间内必须不断取样分析,因此,以测定 COD 浓度作为有机物浓度为主,况且 COD 本身也是一项重要的污染指标。MLVSS/MLSS 的值一直比较稳定,大约为 0.91 左右,以测定 MLSS 作为污泥浓度。

本试验按限制曝气与非限制曝气两种运行方式来进行。首先按限制曝气方式运行,即间歇反应器进水过程中不曝气;而在停止进水并充满有效容积后才开始曝气,一直到反应器液相中有机物浓度达到出水水质要示为止;停止曝气后反应器作为二次沉淀池进行泥水分离和污泥浓缩;然后排出上清液(即处理出水);最后排放剩余污泥,完成了 SBR 法的一个典型运行周期(之后再进水)。简单地说,每个运行周期是由五个操作阶段—进水、反应(也称间歇反应或间歇曝气)、沉淀、排水、排泥(待进水)—组成。研究表明,限制曝气方式运行时最不易发生污泥膨胀。

限制曝气在进水时不曝气,而反应器内不发生好氧生化反应。非限制曝气与限制曝气法的区别仅仅在于开始进水时就立即曝气。本试验每个运行周期为 8h,其中进水阶段为 2h,进水流量为 6l/h,反应为 4h,沉淀、排水与排泥共需 2h。

三、结果与分析

1. 限制曝气试验研究

在试验过程中,培养适宜于降解啤酒废水的活性污泥大约用了一个月时间。在此期间随着不断地驯化与污泥的“成熟”,处理效率与污泥增长速度也逐渐提高。一个月后活性污泥也完全成熟,各项指标都很稳定。图1和图2所表示的是正常试验运行时,COD与MLSS浓度随时间的典型变化情况。如前所述,限制曝气在进水充满反应器有效容积后才开始曝气,以此作为时间的零点开始取样分析,为了使不同负荷下的试验更有可比性,我们将啤酒废水中投加一些啤酒,使其有机物浓度都增加至2000mg/l左右,这样也增加了反应时间,更易于观察间歇反应时各指标的变化与污泥增长规律。

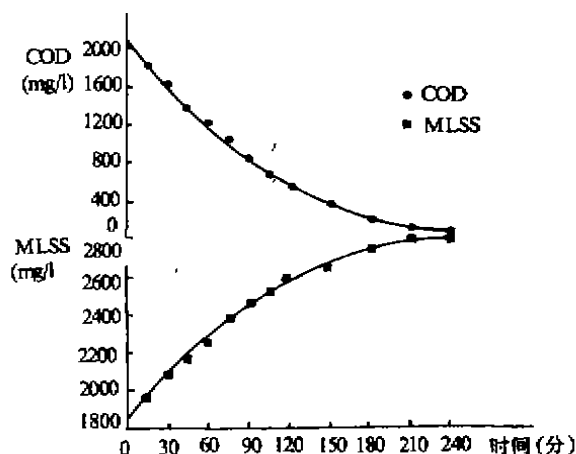


图1 COD与MLSS随时间变化情况

从图2中可以看到,在起始COD浓度为2000mg/l左右,经2h左右的曝气,反应器中的COD浓度便可降到150mg/l,3h以后COD又降至100mg/l以下(相应的BOD在20mg/l以下)。污泥浓度也从2190mg/l增至2860mg/l左右。有机物比降解速率与污泥比增长速率都很大,下面定量地计算这两个速率的数值。根据其定义有:

$$q = \frac{Q(S_0 - S_e)}{V\bar{X}} = \frac{S_0 - S_e}{\bar{X}t} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\Delta X}{V\bar{X}} = \frac{V(X_2 - X_1)}{V\bar{X}t} = \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}t} \quad (2)$$

式中 q —有机物(以COD表示)比降解速率(kgCOD/kgMLSS·d),它表示单位微生物降解有机物的速度,其数值反映了处理效率;

V —反应器有效容积(l);

Q —进水流量(l/h),对于SBR法来说,进水的量等于反应器有效容积(扣除原有污泥所占容积),进水时间应按水力停留时间 t 计算;

t —水力停留时间(d),它应等于进水与曝气两个阶段时间之和。在本研究中, t 按一个运行周期所需要的时间计算,其中包括沉淀、排放出水和排放剩余污泥所需要的时间,共为8h,即 $t=8h=1/3d$;

S_0, S_e —分别表示曝气开始和停止时反应器液相中的COD浓度(mg/l),图2中所示的 S_0 和 S_e 分别为1950和86mg/l;

X_1, X_2 — 分别表示曝气开始和停止时反应器中混合液活性污泥浓度 (mg/l), 图 2 中的 X_1, X_2 分别为 2190 和 2860 mg/l;

$\bar{X}$ — 曝气运行阶段反应器中活性污泥平均浓度 (mg/l), 有 $\bar{X} = (X_1 + X_2) / 2 = 2525$ mg/l;

μ — 比污泥增长速率 (1/d), 它的大小表示单位污泥量的增长速率, 它反映了微生物的增长速度的大小。

ΔX — 单位时间内的污泥增长量 (kg MLSS/d); 本试验中有: $\Delta X = V(X_2 - X_1) / t$;

将上述试验数据代入式 (1) 和式 (2), 可得: $q = (S_0 - S_e) / \bar{X} \cdot t = [(1950 - 86) / 2525] \cdot 3 = 2.23$ (kg COD/kg MLSS · d), $\mu = (X_2 - X_1) / \bar{X} \cdot t = [2860 - 2190 / 2525] \cdot 3 = 0.80$ (1/d)。这样本试验中的有机物比降解速率 q 和比污泥增长速率 μ 分别为 2.23 和 0.80, 比普通活性污泥法高一倍以上。如果计算非稳定状态下的污泥龄 θ_c ^[7], 则有 $\theta_c = 1 / \mu = 1.26$ 日, 也说明在污泥龄仅为 1.26 d 时就能使污水的 COD 降至 90 mg/l 以下, 是高效率的。

如果按有机物的单位容积降解速率 q_v 计算, 则有:

$$q_v = \frac{Q(S_0 - S_e)}{V} = q \cdot \bar{X} = 5.62 \text{ (kg COD/m}^3 \cdot \text{d)} \quad (3)$$

可见其 q_v 也比普通活性污泥法高一倍以上。从式 (3) 还可以看到, 提高反应器内的污泥浓度 $\bar{X}$ 可以增大单位容积的降解速率 q_v 。本试验也表明: 污泥浓度在 4000 mg/l 以下时, 提高污泥浓度虽然不能增大有机物比降解速率 q , 但能缩短反应时间 (使反应器液相中 COD 浓度降至排放标准所需要的时间), 提高单位容积的降解速率, 这可以从图 1 和图 2 所表示的试验中看出。这个试验结果给我们一个启示: 增加反应器内的污泥浓度能提高反应器的处理效率, 减少反应器的有效容积, 节省基建费用; 而 SBR 法的优点之一是污泥不需要回流且污泥沉降性能好, 因此, 很容易维持较高的污泥浓度, 而不受回流污泥浓缩程度及回流比的制约。

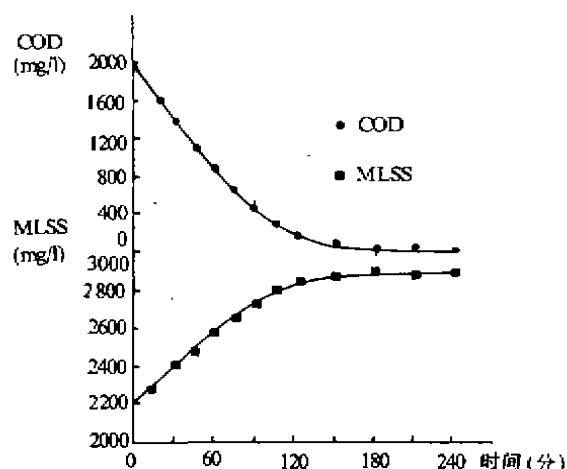


图 2 COD 与 MLSS 随时间变化情况

此外, 用公式 (1) - (3) 计算 q, μ, q_v 时, 式中的水力停留时间 t 按一个运行周期 (包括进水、反应、沉淀、排水与排泥等) 所需要的时间计算。这就相当于, 在节省了二次沉淀池与回流污泥设备的情况下, 得到如此高的有机物比降解速率 q 和单位容积降解速率 q_v 。由此对 SBR 法简易、快速、低耗等特点可略见一斑。

啤酒废水本身缺少氮和磷元素, 为了进一步研究间歇反应时氮磷的转化规律, 在原废水中加入了过量的 N 与 P, 并增加 1 h 的反应时间。在曝气反应开始时, 液相中 BOD、org-N、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 与 Pt 的浓度分别为 1319、97、16 与 21.8 mg/l, 硝酸盐和亚硝酸盐氮

(NO-N) 设验出。上述指标随反应时间的转化情况如图 3 所示。可见 BOD、org-N 和 NH_4^+-N 的浓度都在急剧减少, 而 NO_x^--N 仍没检出。这说明在整个间歇反应过程中没有发生硝化作用, N、P 的减少均为合成微生物细胞所利用。由于污泥龄 θ_c 还不到 2 d, 硝化细菌世代时间长很难繁殖, 所以不发生硝化反应也是合情合理的。

从图 3 可以看到, 在反应初期有机氮和 BOD 急剧地减少, 总磷浓度也不断降低, 2h 以后变化速度明显减缓。而氨氮浓度是先增高后降低直至痕量, 在反应 70min 时其浓度最高。上述现象可以解释为: 由于所有的氮、磷的减少都被细胞合成所利用, 随着 BOD 的减少, 被降解的有机氮大部分氨化成氨氮, 一小部分直接被微生物利用, 随着 BOD 降解速率减缓, 它的变化也减缓。而氨氮的变化实际上是一个动态过程, 反应初期有机氮氨化生成的氨氮的速率大于细胞合成时消耗

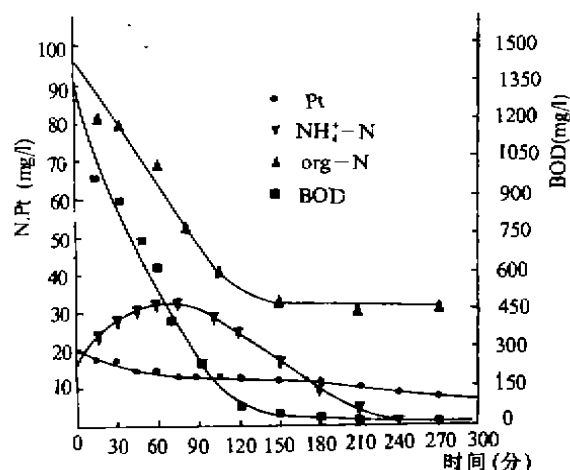


图 3 BOD, NH_4^+-N , $\text{O}-\text{N}$, Pt 随曝气时间的变化

氨氮的速率, 使氨氮浓度增高; 在反应后期有机氮转化氨氮的速度减缓, 氨氮浓度也迅速降低。总磷的浓度与 BOD 浓度的变化基本呈正相关。

经过 5 h 的反应, BOD、总氮 (N_t) 和总磷的浓度分别降至 13、32 和 7.5mg/l, 那么, BOD、N 与 P 分别消耗了 1306、81 与 14.3mg/l。由此可得在间歇反应过程中, 有机物降解对 N、P 的需要量为:

$$\text{BOD:N:P} = 1306:81:14.3 = 100:6.2:1.1 \quad (4)$$

由于通常的 SBR 法的污泥龄短, 微生物的比增长速率大, 其内源呼吸作用较弱, 微生物细胞的合成代谢相对于其分解代谢占主导地位, 降解单位有机物需要的 N、P 较多。根据式 (4) 每降解 1000mg/l 的 BOD, 通过同化作用就能去除 62mg/l 的氮和 11mg/l 的磷。这也是 SBR 法不可忽视的特有功能。

2. 非限制曝气试验研究

非限制曝气的特点是在开始进水时就曝气, 直至反应阶段结束。本试验共曝气 6h, 其中含进水时间 2h。反应器中原有 1.72l 浓缩的活性污泥, 其 MLSS 浓度为 14368mg/l, 液相中 COD 浓度为 85mg/l。由于 COD 浓度为 2227mg/l 的废水连续 2h 进入反应器后, COD 与 MLSS 浓度随曝气时间的变化情况如图 4 中的实验所示。因废水中 COD 很高而 MLSS 接近于零, 所以在进水阶段, 进入反应器中的 COD 量远大于被生物降解的量, 液相中的 COD 呈上升趋势; 虽然污泥 (MLSS) 不断增长, 但其 MLSS 浓度也不断被稀释, 而后者起

主要作用,结果 MLSS 浓度急剧下降。在停止进水后的反应阶段,COD 浓度逐渐降低,MLSS 浓度也逐渐升高。

图 4 中的虚线表示,假设不进行曝气,即反应器内不发生生化反应(有机物不降解微

生物也不增长)时,废水加入后反应器中的 COD 与 MLSS 浓度的变化情况(根据计算)。虚线上进水终点即反应起点(120min 处)的 COD 与 MLSS 浓度分别为 1958mg/l 和 1801mg/l,它们相当于采用限制曝气时反应阶段的起始浓度,其该时的 F:M 值与图 1 所表示的试验相近。由于该试验在进水阶段就开始曝气,降解了相当一部分有机物,所以,它使 COD 小于 100mg/l 以下所需要的反应阶段的时间,比限制曝气试验所需的时间短一些,实质上也是提

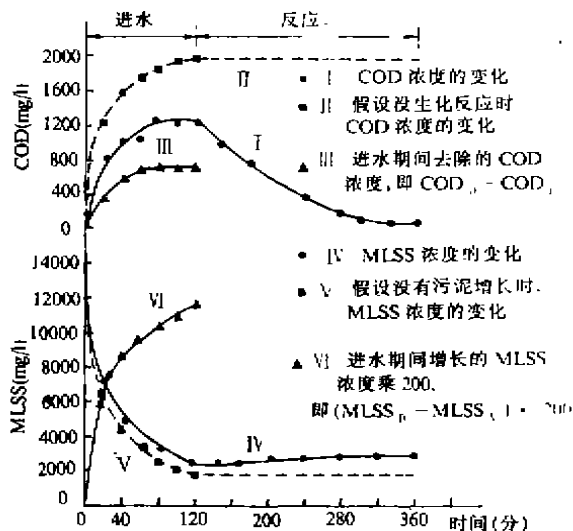


图 4 进水与反应期间反应器内 COD 和 MLSS 浓度的变化情况

高了处理效率。反之,限制曝气方式运行意味着在进水阶段反应器被闲置不用,没有起到任何净化作用,降低了设施的利用率。

从图 4 还可以看到,如果采用限制曝气方式运行,在进水终点时 COD 和 MLSS 分别为 1958mg/l 和 1801mg/l,而本试验在进水终点时(见实线)的 COD 也最高,但却只有 1253 mg/l,该时的 MLSS 也最低,但也达 2159mg/l。这也是由于在进水阶段的曝气作用降解了有机物,同时使污泥相应地增长,降低了该时的 F:M 值。因此,非限制曝气方式运行的 SBR 法能缓解高浓度有机废水的冲击负荷,使之处理高浓度有机废水也是可能的。此外,一定量的 COD 能在进水和反应两个阶段被降解,而不是仅在反应阶段降解,这样,非限制曝气方式运行时,反应器内需氧速率也比较均匀,这给供氧的运行控制也提供了方便。

在整个试验过程中,从未发生过污泥膨胀现象,而且污泥的沉降性能很好,SVI 也始终小于 80mg/l。

四、结 论

前面介绍的那些试验结果都是在试验中经过多次验证的,图 1—图 4 所示的试验结果仅仅是具有普遍性的几例。简单地说,通过大量的试验研究,可以得出如下结论:间歇式活性污泥法工艺流程简单,处理效率高,在节省了二沉池与回流污泥设备的情况下,其

有机物比降解率 q 与污泥比增长速率 μ 仍然比普通活性污泥法大一倍以上; 由于它在降解有机物过程中对于时间来说是一种理想的推流式反应, 因而反应推动力大, 在降低基建与运行费用方面大有潜力可挖; 不易发生污泥膨胀, 污泥沉淀性能好易于浓缩等等。这些结论也可以说是对公认的 SBR 法所具有优点的结论。除此之外, 本试验研究还得出以下结论:

1. 由于 SBR 法无需污泥回流, 而且污泥易沉淀和浓缩, 这样可以通过增大间歇反应的起始污泥浓度来增加反应器内的微生物总量, 降低污泥负荷, 减少反应时间, 提高处理效率或减小反应器有效容积。

2. 虽然在反应阶段即将结束时, 反应器内液相中有机物浓度很低, 微生物已进入内源呼吸期, 污泥也刚开始自身氧化, 但在整个反应阶段底物浓度一直很高, 微生物在绝大部分时间内处于对数增长期。污泥龄短 (污泥增长时间按一个运行周期计算时 $\theta_c = 1.26d$, 若仅按实际增长的反应时间计算, 污泥龄还不到 $1d$), 微生物合成代谢即同化作用占主导地位, 因此用于合成细胞所需要的氮、磷量也较多, 为 $BOD:N:P = 100:6.2:1.1$, 这个值高于传统的理论值 $100:5:1$, 更高于普通活性污泥法的需要量。这就是说, SBR 法通过同化作用去除废水中的氮、磷也是不可忽视的。

3. 非限制曝气方式运行能缓解冲击负荷, 充分利用反应器的处理能力, 缩短一个周期的运行时间, 同时能使需氧速率趋于均匀, 利于运行管理。

综上所述, 间歇式活性污泥法非常适用于水质水量变化很大的中小城镇的生活污水处理, 以及水质水量变化大、甚至间歇排放的工业废水处理。它是很适合我国国情的有待进一步开发的污水处理工艺, 对它的研究与开发还应当进一步地全面深入地开展。

参 考 文 献

- [1] Irvine, R. L., et al., J. WPCF., 57 (8), 847 (1985)
- [2] Melcer, H., et al., J. WPCF., 59 (2), 79 (1987)
- [3] 坂川胜见, 下水道协会志, 25 (209), 52, (1988)
- [4] 王国生, 给水排水, 77 (1), 40 (1989)
- [5] 刘永淦, 陈纯, 中国给水排水, 5 (3), 18 (1989)
- [6] 彭永臻, 环境科学丛刊, 10 (4), 30 (1989)
- [7] 张自杰, 彭永臻, 环境科学, 5 (1), 70 (1984)

REGULARITY OF BIOLOGICAL DEGRADATION OF SUBSTRATE IN SEQUENCING BATCH REACTOR

Peng Yongzhen, Zhang Zijie, Dong Fanghua, Wang Shuying

(Municipal and Environmental Engineering Department Harbin Architectural and Civil Engineering Institute)

ABSTRACT

This study was based on the test of beer wastewater treatment. The experimental results further tested and verified that SBR had the advantages of simplicity, high-speed and low cost. Besides, we drew the following conclusions: increasing the original sludge concentration of batch reaction could raise the treatment efficiency or reduce the reaction time; unlimited aeration style had good tolerance to shock loads, its oxygen demand was even, and it could reduce the reaction period; The anabolism of the microorganism cell played a leading role in the batch reaction, the nitrogen and phosphorus demand was higher than the traditional theoretical value. It was pointed out in the paper that SBR was a very suitable wastewater treatment process for our country, we should strengthen researches on it and make it applied widely.

Keyword: batch reactor, aeration, COD, SBR