

垃圾填埋渗滤液处理中试工艺研究

李 军 王淑莹

(北京工业大学建筑工程学院)

王宝贞 聂梅生 赵红静

(哈尔滨工业大学市政与环境工程学院)

前言

垃圾填埋是一种广泛应用的垃圾处置方法,而其生产的渗滤液会导致地下水和地表水的二次污染,为防止渗滤液的污染,必须尽量减少渗滤液的产生量并根据渗滤液的水质、水量特点及排放要求采用切实可行的方法。深圳市垃圾渗滤液的 COD、BOD₅ 和 NH₄⁺-N 浓度明显高于国内外其他城市,见表 1。深圳市下坪垃圾填埋渗滤液处理后出水排入城市下水道,然后入宾河污水处理厂做最后处理。深圳环保局规定,垃圾渗滤液的出水需达到: COD < 600mg/l、NH₄⁺-N < 25mg/l。在充分研究了深圳市渗滤液特点和处理排放标准后,笔者进行了处理系统和工艺流程的研究探讨。

1 处理工艺选择

表 1 深圳市垃圾填埋渗滤液水质与其他城市比较表

参数	上海	杭州	广州	深圳	台北	BrynPosteg, UK	Barcelona, Spain
COD	1500 - 8000	1000 - 5000	1400 - 5000	15, 000 - 60, 000	4000 - 37, 000	5518	86, 000
BOD	200 - 4000	400 - 2500	400 - 2000	5000 - 36, 000	6000 - 28, 000	3670	73, 000
TN	100 - 700	80 - 800	150 - 900	650 - 2000	200 - 2000	157	2750
SS	30 - 500	60 - 650	200 - 600	1000 - 6000	500 - 2000	184	1500
NH ₄ ⁺ -N	60 - 450	50 - 500	160 - 500	400 - 1500	100 - 1000	130	1750
PH	5 - 6.5	6 - 6.5	6.5 - 8.0	6.2 - 8.0	5.6 - 7.5	5.0 - 8.0	6.2

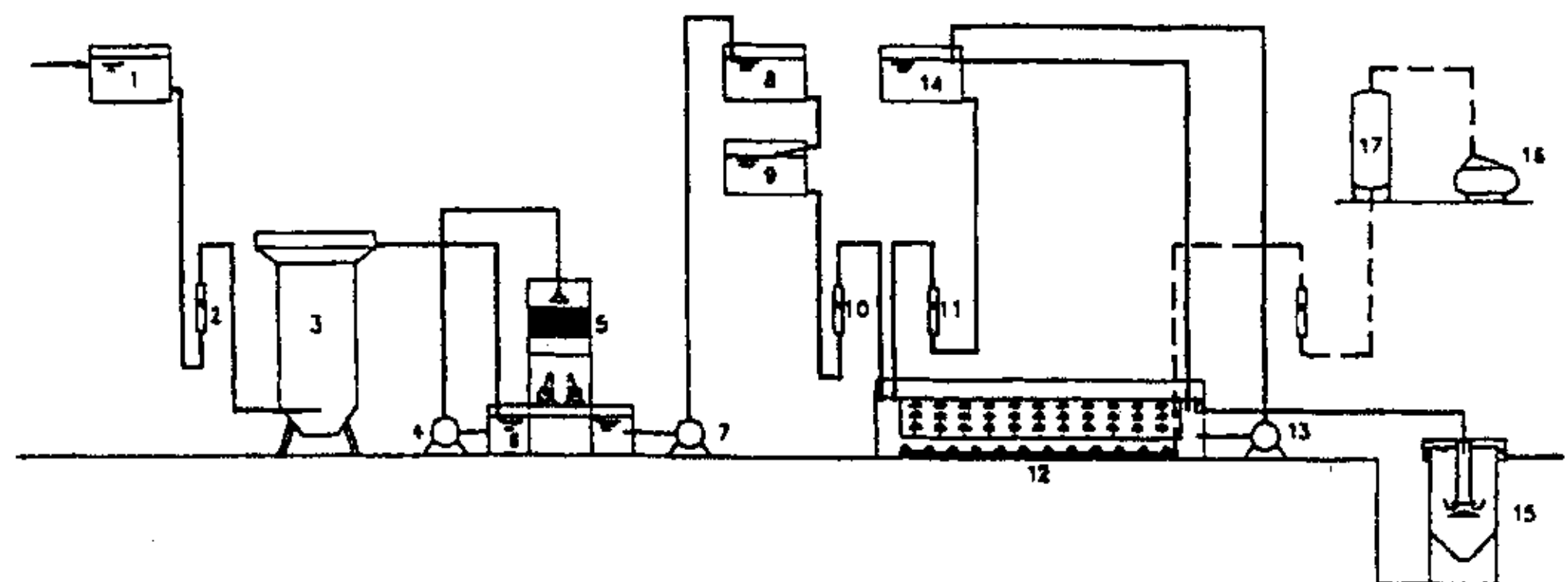
由表 1 知深圳市垃圾填埋渗滤液水质与其他城市相比,具有 COD、BOD 和 NH₄⁺-N 浓度高的特点。

根据试验期间对深圳市垃圾填埋场渗滤液的试验结果,深圳市生活垃圾渗滤液 BOD₅/COD 一般在 0.4 - 0.7 左右,属于易生物降解的有机废水,但 COD 典型值高达 25000 mg/l,若要达到处理后出水 COD < 600mg/l,则其去除率要达到 98.6%。故须选用高效节能的厌氧生物处理技术,后接好氧生物处理。同时,该渗滤液含氨氮高达 400 - 1500 mg/l,若要处理后出水达 NH₄⁺-N < 25 mg/l,必须进行脱氮处理。碱化鼓风吹脱,是首先将渗滤液加碱呈碱性(PH > 9)使其中的氨离子转化为游离氨(NH₃),然后送入吹脱塔中以喷淋方式和通过

鼓风吹脱去除游离氨,以使后续的 A/O 淹没式生物膜曝气池进水 C/N 趋于合理,并在其中进行硝化,将氨氮转化为硝态氮,同时通过回流硝化混合液在去除 COD 的同时,去除 TN。为了确保处理出水 COD < 600 mg/l,可在二沉池中辅以同步化学沉淀。因此,确定试验流程如下:

原生渗滤液→复合式厌氧反应器→碱化吹脱塔→A/O 两段淹没式生物膜曝气池→混凝沉淀二沉池→城市下水道

2 实验装置



1,原生渗滤液高位水箱;2,流量计;3,复合式厌氧反应器;4,循环泵;5,碱化吹脱塔;6,循环水池;7,提升泵;8,A/O池进水高位水箱;9,A/O池进水恒位水箱;10,流量计;11,回流混合液流量计;12,A/O淹没式生物膜曝气池;13,回流泵;14,回流混合液恒位水箱;15,沉淀池;16,空压机;17,储气罐

图1 渗滤液处理中试装置工艺流程

2.1 复合式厌氧反应器

本试验采用复合式厌氧反应器,它由底部的 UASB 和上部 ABF(厌氧生物膜区)组成,因而具有这两种厌氧反应器的优点。由于其上部的生物膜载体填料(盾式复合材料)对悬浮污泥具有很好的捕集截留效能,而且也不影响气体的分离,因此其上部不必设三相分离器,只设溢流出水槽和集气室即可。其生物量大,生物相丰实,可承受较高的有机负荷,这样的厌氧反应器比 UASB 构造简单,且处理效果好。

试验用的复合式厌氧反应器,呈圆筒形,直径 0.8m,底部为截头圆锥体,顶部为溢流堰槽和集气室组成,总高度为 2.5m。反应器主体分为上下两部分,下部为污泥床,高 1.1m,其中锥体部分 0.5m;上部为淹没式生物膜区,高 0.9m,其中装填复合式填料。淹没式生物膜层之上有 0.25m 高的澄清区,澄清区经周边式溢流堰流入圆环形集水槽中。厌氧反应器的总容积为 1.16m³,其中污泥床区占 0.4 m³,淹没式生物膜区 0.43 m³,澄清区 0.13 m³ 和集气室 0.2 m³。在稳定运行时,进水量 Q = 20l/h(0.48 m³/d),其水力停留时间为 2 天,从第 3 个月至第 6 个月,厌氧反应器内温度为 20℃ 至 34℃。

2.2 碱化吹脱塔

厌氧反应器出水氨氮含量很高,达 1000mg/l 以上,且 COD/NH⁴⁺-N 比值仅为 4 左右,若让其直接进入 A/O 淹没式生物膜曝气池,很难实现生物脱氮,因此利用鼓风吹脱塔进行部分脱氮,以增加 COD/NH⁴⁺-N 的比值和减少氨氮的浓度,有利于在 A/O 池中进行

有效的生物脱氮, 试验用的吹脱塔用圆筒形, 直径 0.8m, 高 2.0m, 其中装填 1.2m 高的球形塑料填料, 厌氧反应器出水流入循环水池, 用泵抽送至吹脱塔顶部进行喷淋布水, 在吹脱塔后部安装两台鼓风机, 强制空气流自上而下流经填料, 与水滴逆流接触。

从循环贮水池用泵抽循环水 $Q_r = 500\text{l/h}$ 至吹脱塔, 从该池排出的水量为 20l/h , 循环比为 25:1; 鼓风机吹送空气量为 $70\text{ m}^3/\text{h}/\text{台}$, 2 台供气量为 $140\text{ m}^3/\text{h}$, 气水比为 280:1。循环集水槽内水的体积为 102L, 其水力停留时间(HRT)为 5h。

2.3 淹没式生物膜 A/O 池

A/O 淹没式软填料生物膜法的优点是通过在载体上附着形成的生物膜, 在不同的部位有不同的优势菌种, 即在 A 段有以反硝化和降解有机物的异氧菌为主的微生物群落, 而在 O 段的前部和后部分别以降解有机物的异氧菌和硝化菌为优势菌种。由于在淹没式生物膜中硝化和反硝化菌各有自己的专用领地, 其生存环境远比活性污泥法优越, 因此完成硝化和反硝化的时间短, 约为延时曝气池法的 $1/3 - 1/2$, 此外, 淹没式软填料生物膜的另一个优点是生物膜上的生物菌种更为多样性, 相交构成的食物链长, 增长的生物膜大部分被原生动物和后生动物作为食料消耗掉。所以, 其剩余生物膜仅为活性污泥法剩余污泥量的 $1/10 - 1/5$ 。

2.4 厌氧污泥和生物膜的培养

厌氧反应器接种城市污水厂消化池污泥, 随着培养时间的延长, 其 COD 去除率逐渐提高。三个月后, COD 去除率达 70%, 并有沼气产生, 此时底部的厌氧污泥和填料上生物膜趋于成熟; 淹没式生物膜 A/O 池采用城市污水处理厂二沉池中污泥接种, 动态培养, 历时二个月后, O 池中, 前段生物膜厚, 后段生物膜薄, 颜色为棕褐色, 生物相镜检发现有大量草履虫和线虫, A 池中填料上生物膜呈黑褐色, 密度较大并有小气泡吸付在填料表面, 这说明反硝化菌已开始在填料表面上初步形成, 将少量的硝酸盐还原成氮气。

3 试验结果及讨论

为了优化各构筑物的运行参数, 探索最佳运行条件, 下面将对各单体的构筑物进行优化试验。

3.1 复合式厌氧反应器

图 2 为复合式厌氧反应器在两种不同运行温度下的进出水 COD 和 BOD₅ 变化曲线。

由图 2 可见, 厌氧反应器的 COD 去除效率受温度影响较大。20℃时, COD 和 BOD₅ 的平均去除率分别为 70.9% 和 77.3%; 水温 34℃时, COD 和 BOD₅ 的平均去除率上升到 83.3% 和 88.4%, 此时进水的 COD 和 BOD₅ 的均值为 23888 mg/l 和 15250 mg/l, 出水的 COD 和 BOD₅ 均值为 4060 mg/l 和 1771 mg/l, 故适合的处理温度为 34℃, 此时的水力停留时间为 2 天, 平均 COD 容积负荷为 $9.5\text{kgCOD}/\text{m}^3/\text{d}$ 。

图 3 为复合式厌氧反应器进水和出水的总有机挥发酸 TVA 和碱度变化曲线。由图 2 和图 3 可见, TVA 与 COD 变化趋势基本一致, 出水 TVA 随着出水 COD 降低而降低, 当出水 TVA 为 700 mg/l 左右时, 出水 COD <4500 mg/l。实验证明, TVA 积累过多, 将会抑制甲烷菌的活性, 因此 TVA 可作为厌氧反应器是否正常运行的主要判断和控制指标。

厌氧反应器出水碱度和 PH 均较进水高, 这是由于甲烷菌将挥发脂肪酸转化为甲烷的同时, 产生了重碳酸盐, 因而使出水碱度和 PH 上升。出水碱度在 2500 - 5000 之间, 说明该渗滤液碱度有一定的缓冲能力。

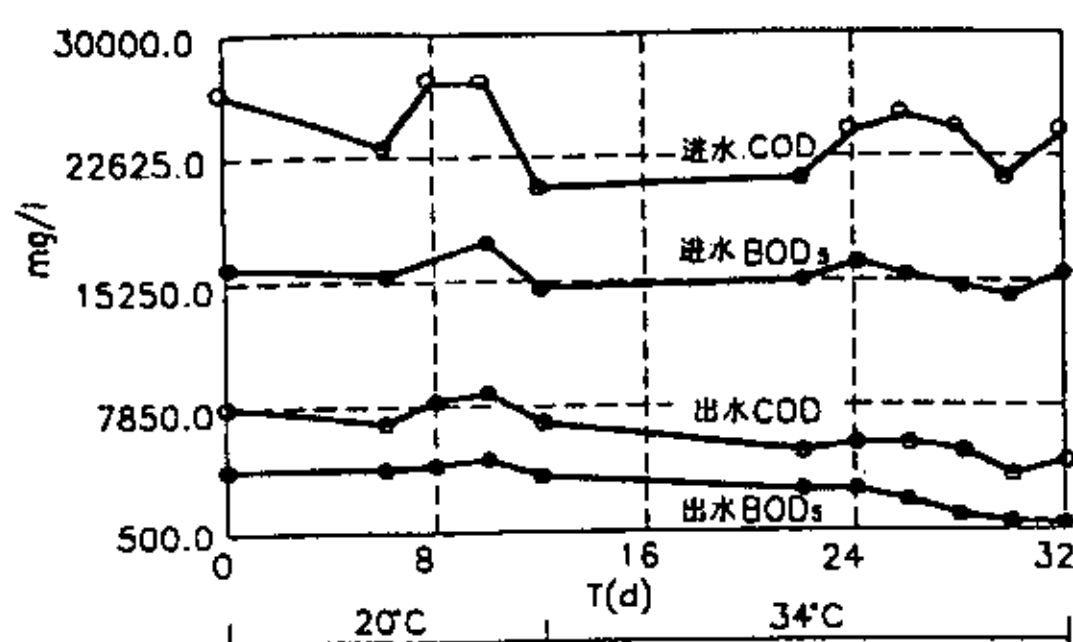


图2 不同温度时厌氧反应器进、出水 COD 和 BOD5 浓度变化曲线

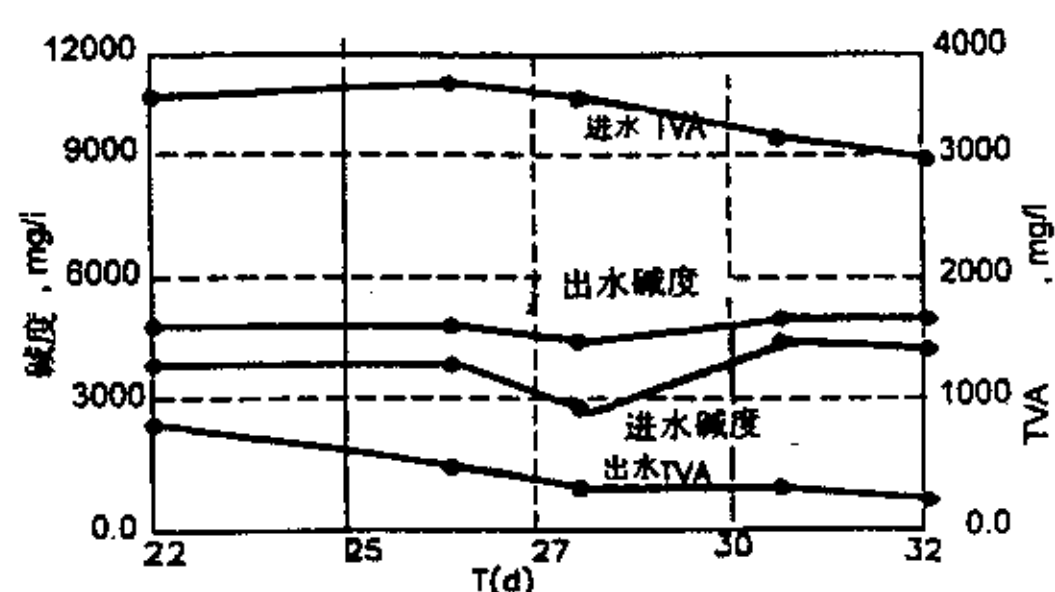


图3 厌氧反应器进、出水的总有机挥发酸 TVFA 浓度和碱度变化曲线

3.2 碱化吹脱塔

图4为在水温20℃的条件下,不同PH时 NH_4^+-N 随吹脱时间的变化曲线。由该图可见,氨氮随吹脱时间延长而下降,在吹脱时间为5h和PH=8.0的条件下(即厌氧出水直接进吹脱塔)时, NH_4^+-N 去除率为35.3%;将PH用石灰调到9.1时, NH_4^+-N 去除率上升到67.8%。这是由于PH对水中游离氨和铵离子分布的影响,PH=8.0时, NH_3 占8%,PH=

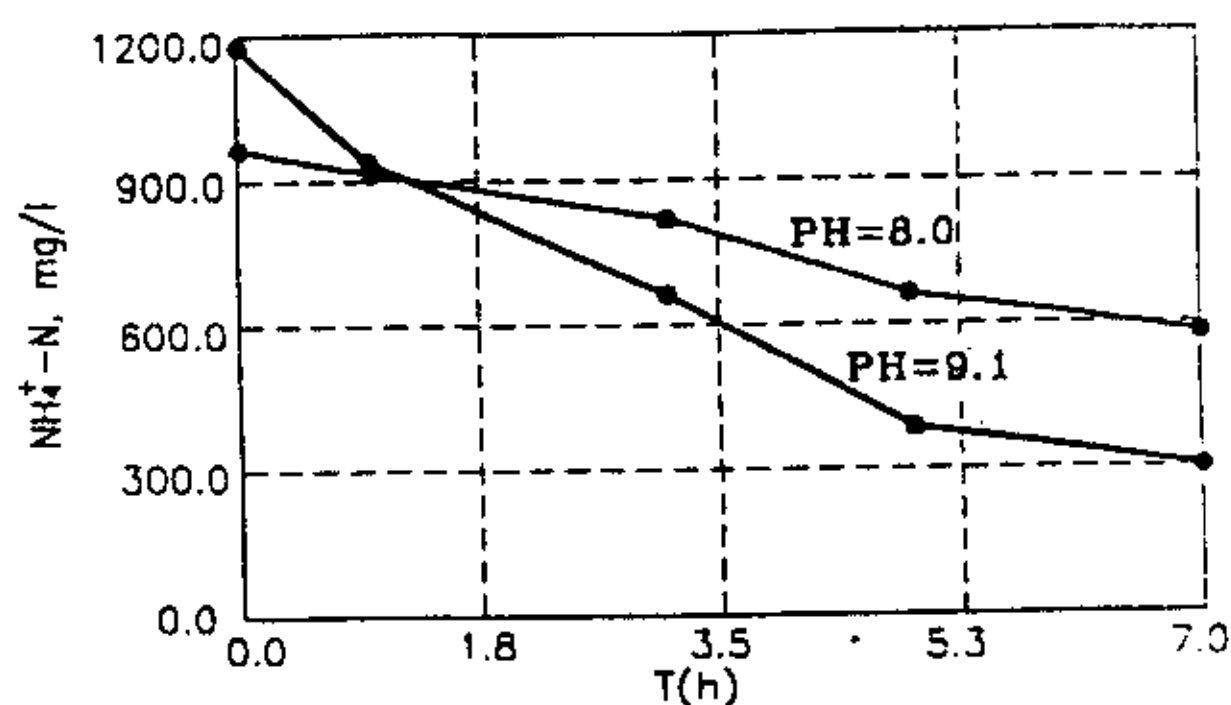


图4 不同PH时 NH_4^+-N 浓度随吹脱时间的变化曲线

9.1时, NH_3 占37.4%,所以在相同的吹脱时间条件下,PH=9.1时的 NH_4^+-N 去除率显著高于PH=8.0时的去除率。从节省药剂和提高除氨率的折衷考虑,确定适宜的PH为9.1、吹脱时间为5h、气水比为280:1。

吹脱后,COD也得到了部分去除,其去除率为19.7%,吹脱后出水的 $\text{COD}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为8,水中 $\text{DO} < 0.2 \text{ mg/l}$,有利于后续的A/O池的脱氮。此外,取吹脱塔内塑料环填料上的生物膜做镜检分析,发现其生物相丰满、呈多样性,有钟虫、累枝虫等原生动物。因此空气吹脱逸出氨气的同时,微生物对COD和BOD也有一定的降解作用。

3.3 淹没式生物膜A/O池

深圳市垃圾渗滤液 NH_4^+-N 含量高,经碱化吹脱塔除氨后出水 NH_4^+-N 仍在300mg/l左右,但此时 $\text{COD}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为8左右,趋于合理,因此选择A/O淹没式生物膜曝气池处理吹脱塔出水,在去除COD的同时,可脱氮。为了进一步探索A/O池运行的最佳条件,进行了混合液回流比、水力停留时间等因素的影响试验。

回流比是影响A/O池脱氮效果的一个重要因素。理论上,总氮去除率与回流比的关系为:

$$\eta_{\text{TN}} = R / (1 + R) \quad (1)$$

式中:R—回流比;

η_{TN} —总氮去除率。

显然 R 越大, 总氮的去除率越高, 但实际上受缺氧段脱氮菌数量的限制及回流水溶解氧的影响, 当回流比大于 4 时, 硝态氮的去除率将会急剧下降。缺氧段内的硝态氮负荷与回流比是相互联系的, 相应地进入缺氧段的硝态氮为:

$$[\text{NO}_3^- - \text{N}]_A = \frac{Q[\text{NO}_3^- - \text{N}]_i + RQ[\text{NO}_3^- - \text{N}]_e}{Q + RQ} = \frac{R[\text{NO}_3^- - \text{N}]_e}{1 + R}$$

式中: $[\text{NO}_3^- - \text{N}]_A$ ——缺氧段进水混合后的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度;

$[\text{NO}_3^- - \text{N}]_i$ ——缺氧段进水的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度(近似为 0);

$[\text{NO}_3^- - \text{N}]_e$ ——出水的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度。

当回流比增大时, $[\text{NO}_3^- - \text{N}]_A$ 降低, 但进入缺氧段内氮负荷相应地增加; 同时, 由于回流水量的增加, 而使硝态氮在缺氧段内的有效停留时间缩短, 所以过多的增加回流比并不一定能提高脱氮率。

图 5 为 $\text{HRT} = 77.5\text{h}$ 、回流比 $R = 3$ 时, 硝酸盐氮、氨氮、碱度沿空间的变化曲线。由图 5 可见, 在 A 段, 氨氮、碱度表现为上升, 这是由于有机氮氨化、反硝化产碱引起的; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进水(混合后)为 29.87 mg/l , 经缺氧段后为 3.22 mg/l , 去除率为 89.0% ; 而在 O 段氨氮、碱度都表现为大幅度下降, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 却上升, 这是由于硝化的原因。经过 A/O 池后的总氮去除率为 64.8% 。

图 6 为不同回流比的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在 A、O 段的空间变化过程线。由图 6 可见, 在 $R = 3$ 时脱氮效率最佳; 此时的 COD 总去除率亦为最高, 达 68.6% , 故选定回流比为 3。在此基础上, 提高进水量, 缩短 HRT, 试验在不同 HRT 时的去除情况以确定 A/O 池的最佳 HRT。实验证明, 当 A/O 池 HRT 从 77.5h 逐渐缩短至 22.1h 时, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N} < 21\text{ mg/l}$, 见图 7; 当 HRT 继续减小至 17.6h 时则出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N} > 49\text{ mg/l}$ 。为保证出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 达到小于 25 mg/l 的排放标准, 所以 HRT 应不小于 22.1h 。

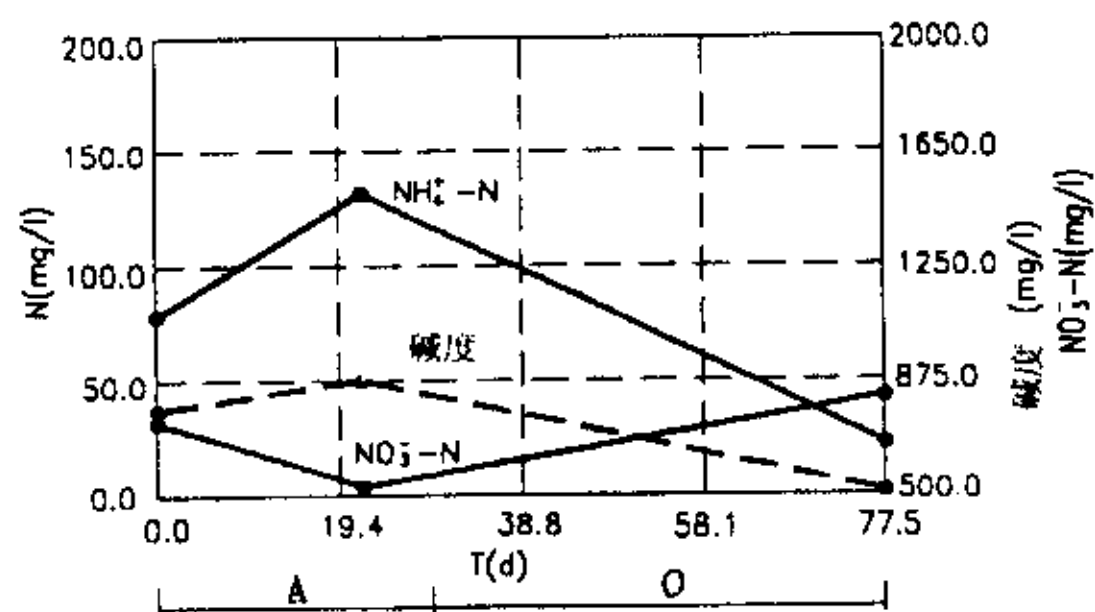


图 5 回流比为 3 时 A/O 池硝酸盐氮、氨氮浓度和碱度变化曲线

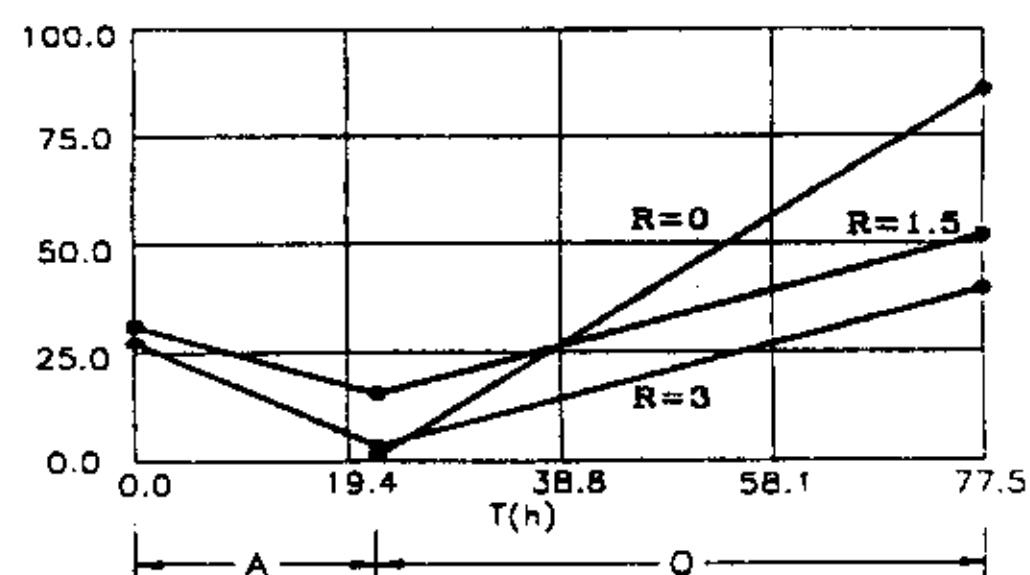


图 6 不同回流比时 A/O 池 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化曲线

在上述各种条件下, A/O 池进出水 COD 变化情况如图 8 所示, 可见出水 COD 浓度在 700 mg/l 左右。

综上所述, 淹没式生物膜 A/O 池适宜的运行条件为: $\text{HRT} = 22.1\text{h}$ (其中 A 段为 6.5h 、O 段为 15.6h), $R = 3$ 。在此运行条件下, 当进水 COD 平均浓度为 2290 mg/l 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度为 218 mg/l 时, 出水 COD 平均浓度为 662 mg/l , COD 平均去除率为 71.1% , 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度为 20 mg/l , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率为 90.8% 。

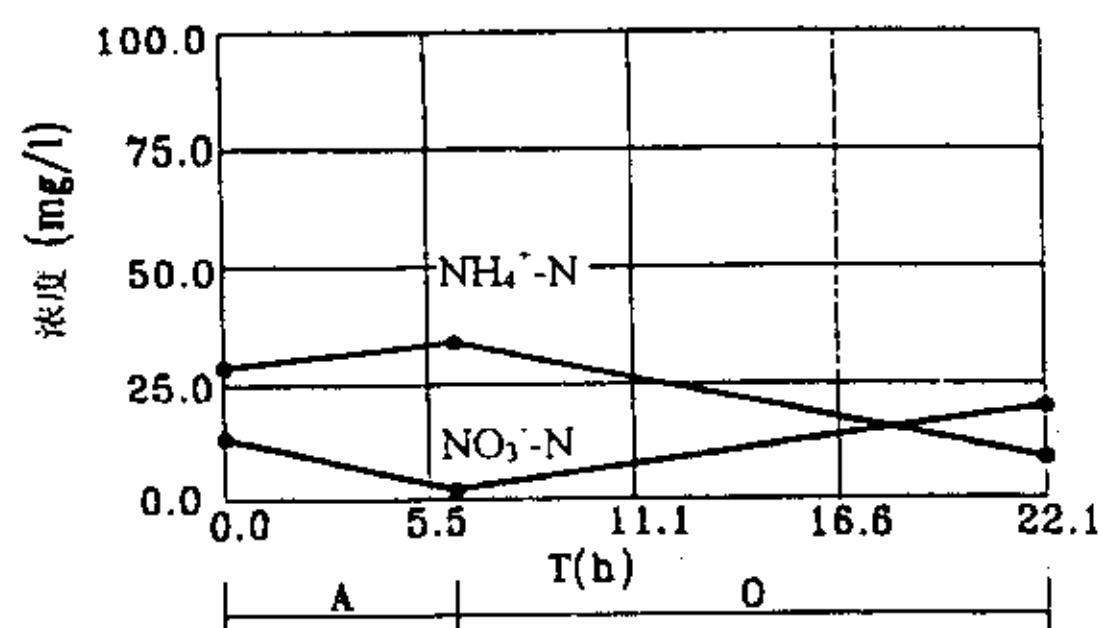


图7 水力停留时间 22.1h、回流比 3 时 A/O 池硝酸盐氮浓度变化曲线

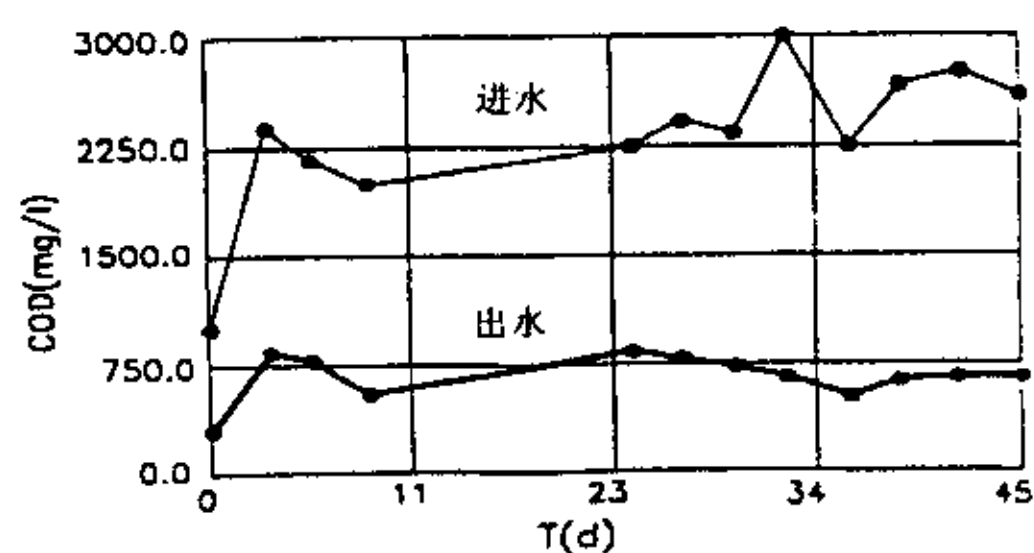


图8 A/O 池进、出水 COD 浓度变化曲线

3.4 混凝沉淀

选用 PAC 和 FeCl_3 两种常用混凝剂进行对比试验,发现:同一药剂用量条件下,PAC 对 COD 去除率高于 FeCl_3 ;PAC 适宜的投加量为 200 – 300 mg/l,相应去除率约为 32.6%,从而使最后出水 COD <600 mg/l。

3.5 系统串联运行试验

确定了各构筑物的优化运行参数后,做整个系统串联起来运行的试验。结果如图 9,图 10 所示(图中数据为连续 8 次监测结果的均值),可见该工艺可使处理后出水达到排入当地城市下水道标准。

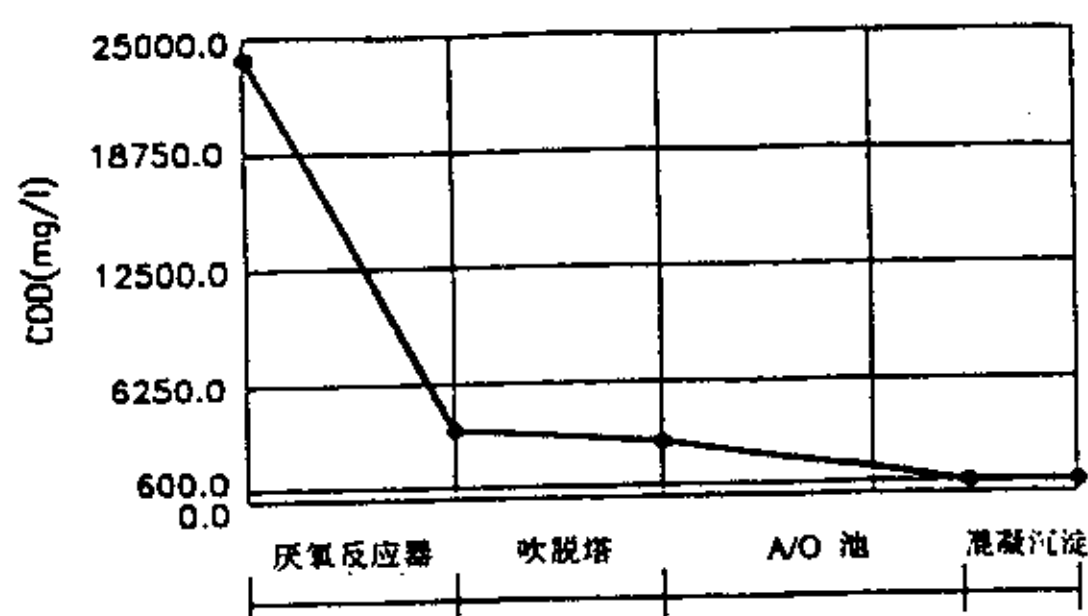


图9 COD 浓度沿程变化曲线

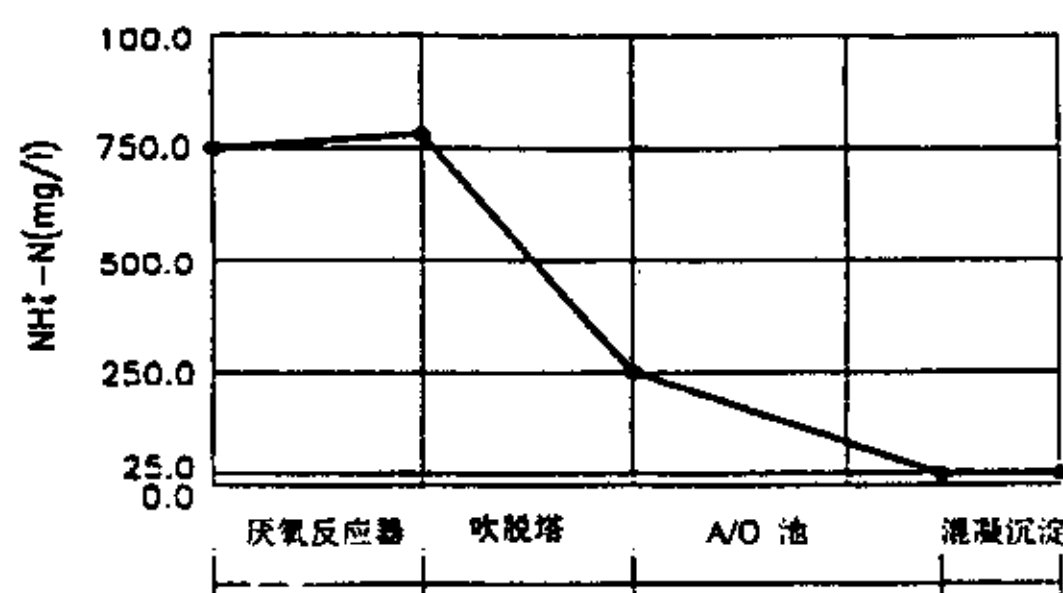


图10 NH_4^+-N 浓度沿程变化曲线

4 填料上生物膜特性的研究

4.1 生物膜表现特性及生物相观察

厌氧反应器中纤维填料上的生物膜呈黑色的细小絮状体,较松散,臭味很浓;碱化吹脱塔内球形填料上的生物膜呈深褐色,底部生物膜最多,上部表层几乎没有,从上而下逐渐减少,洗脱下来观察呈絮状,个体较大,镜检发现底部有豆形虫,累枝虫,线虫等;A/O 池缺氧段生物膜比好氧段生物膜生长速度慢,而且形成的生物膜也没有好氧段的膜丰满、密实,外表看比较薄、颜色呈黑色有臭味。从纤维填料上洗脱下来观察,发现生物絮凝体较松散,个体较小,沿水流方向纤维填料上的生物膜基本趋于一致。A/O 池好氧段生物膜呈棕褐色,无臭味,密实且丰满。好氧段前后端相比较而言,前端的膜较松散,后端的膜较密实。从纤维填料上洗脱下来观察,前端的膜片多呈絮状,个体较大,后端的膜片多呈粒状,个体较小。A/O

池缺氧段填料上的生物膜通过镜检发现只有菌胶团；好氧段在稳定运行期，生物膜上有大量豆形虫，线虫，累枝虫及少量钟虫，草履虫。

4.2 生物膜沉降特性及生物量测定

首先在 A/O 池中沿水流方向确定四个取样点，然后把有代表性的填料从系统中取出，编号为 1#(A 池)，2#(O 池前端)，3#(O 池中部)，4#(O 池末端)，同样在厌氧反应器中取出有代表性的填料编号为 5#，从吹脱塔中取出有代表性的滤球编号为 6#。将填料分别放入容器中加入一定量的自来水搓洗，把含洗脱膜的水转入 1000ml 量筒中，重复搓洗 3-5 次，直至填料上的膜全部洗脱下来而填料变成白色为止。再往盛洗脱膜的量筒中加蒸馏水至满刻度。把量筒中的混合液混均，然后让其进行静置沉淀，分别记下静沉时间及污泥沉淀层容积。实验结果汇于表 2。

表 2 洗脱膜 SVI 值(mg/l)

样品号						
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
SVI(mg/l)	206	200	159	126	206	131

由表 2 知，碱化吹脱塔内球形填料上的生物膜和 A/O 池好氧段纤维填料上生物膜都具有较好的沉降性，O 池中，后段生物膜较前段具有更好的沉降性，有利于脱落生物膜沉淀，使出水水质稳定。

分别取上述混匀的洗脱膜的混合液 100 ml，测定 103℃ - 105℃ 的烘干残渣，得各池中生物量为：

厌氧反应器中，MLSS = 3389mg/l

碱化吹脱塔内，MLSS = 2157mg/l

A/O 池缺氧段，MLSS = 2828mg/l

A/O 池好氧段，MLSS = 4699mg/l

5 结论

深圳市垃圾渗滤液含有高浓度 COD、BOD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ，其适合的处理系统为原生渗滤液 $\Rightarrow$ 复合式厌氧反应器 $\Rightarrow$ 碱化吹脱塔 $\Rightarrow$ A/O 淹没式生物膜曝气池 $\Rightarrow$ 混凝沉淀 $\Rightarrow$ 出水。该系统出水 COD < 600 mg/l、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ < 25 mg/l，可达到排入当地城市下水道标准。

复合式厌氧反应器水力停留时间 2.0d、容积负荷 9.5kgCOD/m³/d、水温 34℃ 时，COD 去除率达 83.3%、BOD₅ 去除率达 88.4%；在 PH9.1、HRT5h、水循环比 25:1、汽水比 280:1 时，碱化吹脱塔 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率达 67.8%、同时 COD 去除率为 19.7%，吹脱后出水 C/N 从 4 上升到 8，有利于 A/O 池脱氮；A/O 淹没式生物膜曝气池适合的 HRT 为 22.1h（其中厌氧段 6.5h、好氧段 15.6h m³）、混合液回流比为 3，在该工艺参数下 COD 去除率为 71.7%、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为 90.8%；A/O 池出水经同步化学沉淀，可使最终出水达到排入当地城市下水道标准。