

利用活性污泥-缺氧变速生物滤池系统进行城市污水深度处理的试验研究

龙腾锐 陈中博* 郝以琼 邓晓莉

摘要 作者采用活性污泥-缺氧变速生物滤池系统进行城市污水深度处理。该系统采用不投加任何药剂的硝化-反硝化工艺。选取曝气池水力停留时间 ($HRT_{曝}$)、缺氧变速生物滤池水力停留时间 ($HRT_{滤}$) 两因素各三个水平, 按 $L_9(3^4)$ 正交表共进行九组正交试验。结果表明: 系统最佳运行条件为 $HRT_{曝} = 4h$ 、 $HRT_{滤} = 3.52h$ 。在最佳运行条件下, 系统 COD_{Cr} 去除率为 91.1%, 缺氧变速生物滤池 $NO_x^- - N$ 去除率为 74.4%。试验后期对系统出水回用可行性分析结果表明: 该系统出水可用于农田灌溉, 消毒后可用作城市生活杂用水。

关键词 城市污水 深度处理 活性污泥法 生物滤池 缺氧变速 水力停留时间

城市污水的再生与回用技术一般用于城市污水二级处理后的深度处理, 其任务是进一步降低二级处理出水所含的悬浮固体、有机物、氮、磷、色度、硬度及细菌数等。本试验采用“活性污泥-缺氧变速生物滤池”工艺对城市污水进行深度处理, 主要是基于以下几方面的考虑:

(1) 国内城市污水处理厂大多采用活性污泥法生物处理工艺。采用生物滤池脱氮具有流程短、运行管理方便等优点, 并便于现有活性污泥法污水处理厂的改造;

(2) 本试验采用的工艺有利于将硝化细菌与反硝化细菌分开, 使之在各自适宜的环境下生长, 且生物膜技术为实现反硝化菌与厌氧菌的共同培养提供了极大的可能性;

(3) 缺氧变速生物滤池除具有传统生物膜

法的生物量高、体积负荷率高、设备体积小等优点外, 由于变速, 在防止滤池填料堵塞方面也具有优势。

一、试验装置及试验过程

1. 试验流程与试验装置

试验流程如图 1 所示。试验的主体装置为有机玻璃制作的上向流变速生物滤池, 其构造及设计参数分别如图 2 及表 1 所示。

滤池采用砾石作为承托层, 滤料采用 1.0~2.0mm 粒径的陶粒, 其平均粒径为 1.34mm、密度为 $1.91g/cm^3$ 、堆积容重为 $0.92g/cm^3$ 、孔隙率为 51.5%、形状系数为 0.60, 滤池内共装填陶粒 7.80L, 滤料原始层高为 400mm, 挂膜后滤料层高为 500mm, 体积为

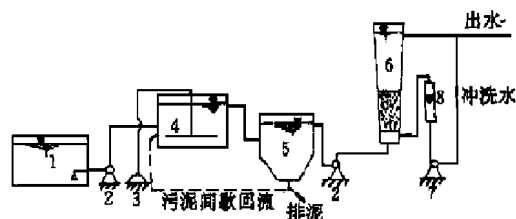


图 1 试验流程示意图

1. 水箱 2. 柱塞计量泵 3. 空气泵 4. 曝气池 5. 沉淀池
6. 缺氧变速生物滤池 7. 离心泵 8. 转子流量计

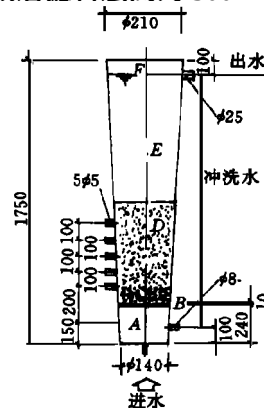


图 2 变速生物滤池构造图

* 建设部人事教育劳动司直属院校与外事处

变速生物滤池设计参数 表 1

区号	名称	高度 (mm)	内径 (mm)	有效容积 (L)
A	布水区	240	140~150	3.96
B	多孔板	10	150	
C	承托层	100	150~154	1.81
D	反应区	500	154~174	10.58
E	澄清区	800	174~206	22.73
F	保护区	100	206~210	
总 度		1750	140~210	39.08 (不包括保护区)

10.58L。

2. 试验水质

试验用污水取自重庆市某城市下水道。该下水道除收集生活污水外,还收集食品加工厂、酿造厂、针织厂、纸箱厂等排放的工业废水,其水质为较典型的城市污水。试验期间污水水质如表 2 所示。

试验污水水质 表 2

项 目	数 值
COD _{Cr} (mg/ L)	90.6~500
SS (mg/ L)	80~300
NH ₄ ⁺ - N (mg/ L)	13.0~42.0
NO _x ⁻ - N (mg/ L)	0
TN (mg/ L)	24.5~52.0
pH	6.7~7.2
碱度 (mgCaCO ₃ / L)	250~300

3. 试验过程

整个试验持续十月余,历经预备试验、正交试验和后期试验三个阶段。

(1) 预备试验

预备试验主要是对试验系统进行启动和驯化调试。

①活性污泥的培养与驯化:本试验曝气池的活性污泥来源有二:其一,粪便水直接曝气培养,然后用城市污水驯化而得;其二,取某针织厂射流曝气池的活性污泥接种经城市污水培养驯化而得。

②缺氧变速滤池填料挂膜:本试验采用低负荷方法启动缺氧变速生物滤池,即在装好填料的滤池中注满城市污水和粪便水(体积比 1:1),静置两天后,以 2.8L/h 的流量(HRT=3.8h)连续进城市污水,同时通过计量泵往滤池内打入少量活性污泥,这不仅可以加快挂膜速度,而且可以较好地保证生物膜的脱

氮能力,因为根据文献报道^[12],曝气池活性污泥在缺氧条件下会很快显示出脱氮功能。经近一个月的启动,效果不理想。后改用高负荷方法,即把滤池进水改为 COD_{Cr}>2000mg/L 的粪便水与城市污水的混合水,并每隔 2~3d 往滤池内投加活性污泥(SS 约 5~6g/L),每次约 10L 左右。采用间歇回流的方法使污泥与陶粒混合,不回流时及时排掉滤池澄清区的悬浮污泥。与低负荷法相比,高负荷法挂膜速度明显提高,经一月左右,整个填料层已经完全挂膜,出水水质明显好转,滤池挂膜试验结束。

③系统调试:按试验流程将曝气池与缺氧滤池串联成系统运行,在曝气池 HRT=6h、滤池 HRT=3.8h 的条件下,运行两周后,曝气池氨氮去除率达 75%以上,缺氧滤池的脱氮效率已达 80%,此时,认为系统启动驯化已完成。

(2) 正交试验和后期试验

正交试验的目的在于探求试验系统的最佳运行条件,历经三个月,然后进入后期验证试验,即在最佳运行条件下,考察系统总出水作为回用水的可行性。

二、系统最佳运行条件的试验研究

在硝化-反硝化脱氮工艺中,各种污染物质的变化过程是相当复杂的,硝化段的运行结果决定了反硝化段的进水水质。但硝化对反硝化的影响具有一定的矛盾性,因为硝化作用越彻底,反硝化可利用的 NO_x⁻-N 越多,而同时可供利用作为反硝化过程电子供体的有机物越少。对于此工艺中的碱度变化也可能存在供需不平衡的问题。通常可以采用投加有机物和碱的方法来解决上述矛盾,但这样会增加运行费用。本试验立足于在不投加任何药剂的条件下确定其最佳运行条件,影响因素较多,故采用正交试验优选。

1. 正交试验设计及运行过程

(1) 影响因素与水平的确定

本试验采用系统 COD_{Cr} 去除率及缺氧变速生物滤池的脱氮率作为正交试验的考察指标。

溶解氧一般不成为硝化作用的抑制因素,

一般曝气池溶解氧为 2~6mg/ L 时,硝化速率与溶解氧浓度无关^[1]。本试验过程中控制曝气池溶解氧浓度在 2.0~3.5mg/ L 之间,溶解氧不列为正交试验的因素。另外,根据预备试验的运行结果可知,缺氧变速生物滤池进水及反应器内溶解氧浓度均小于 0.5mg/ L,能保证反硝化作用所需的缺氧环境。

水力停留时间具有对处理效率影响明显、易操作等特点,本试验中选择曝气池水力停留时间(以下记为 $HRT_{曝}$,因素代号为 A)、缺氧变速生物滤池水力停留时间(以填料层容积计算,记为 $HRT_{滤}$,因素代号为 B)为正交试验的因素,并考虑因素间的交互作用。

试验因素水平的选择依据有关设计手册^[4]及反应器的设计参数,对每个因素选取三个水平。

$HRT_{曝}: A_1 = 4h; A_2 = 6h; A_3 = 9h$ $HRT_{滤}: B_1 = 1.90h; B_2 = 2.71h; B_3 = 3.52h$

2) 正交试验表头设计及试验安排

根据选定的影响因素及水平,采用 $L_9(3^4)$ 正交表^[5]安排试验,其中第三、第四列为交互作用列,如表 3 所示。

3) 正交试验运行过程

在正交试验过程中,为避免各种环境因素对系统运行的影响,对曝气池溶解氧浓度、活性污泥浓度、污泥沉降比等参数进行了控制,对温

度、pH 值等则未进行控制。表 4 中列出了正交试验运行的环境条件。

试验过程中采用滤池出水回流的方法定期(8~10d)冲洗滤池以驱除氮气气泡、促进生物膜的更新。每次冲洗时间为 0.5~1.0h,冲洗水量 200L/ h 左右,冲洗时滤池填料层膨胀率大约为 20%。

2. 试验结果

剔除异常数据后的正交试验结果如表 5 及图 3、图 4、图 5 所示。

3. 正交试验结果的方差分析

由于试验过程中要充分考虑 A、B 两因素的交互作用对系统运行结果的影响,使得本正交

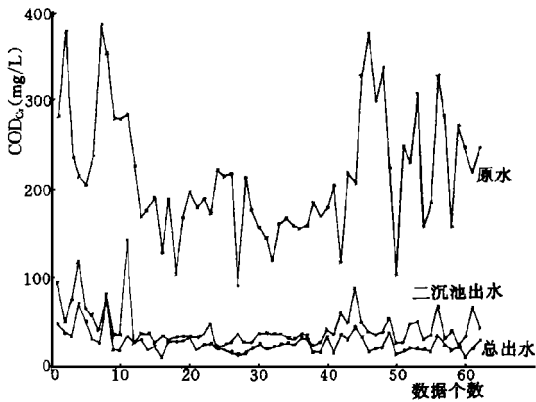


图 3 系统 COD_{Cr} 逐日变化图

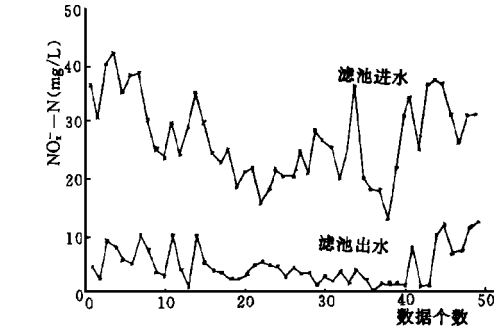


图 4 滤池进、出水氨氮逐日变化图

正交试验安排表 $L_9(3^4)$				表 3
水平 因素 试验号	A $HRT_{曝}(h)$	B $HRT_{滤}(h)$	(A × B)	(A × B)
	1	2	3	4
1	1 (4)	1 (1.90)	1	1
2	1 (4)	2 (2.71)	2	2
3	1 (4)	3 (3.52)	3	3
4	2 (6)	1 (1.90)	2	3
5	2 (6)	2 (2.71)	3	1
6	2 (6)	3 (3.52)	1	2
7	3 (9)	1 (1.90)	3	2
8	3 (9)	2 (2.71)	1	3
9	3 (9)	3 (3.52)	2	1

正交试验运行的环境条件										表 4
DO (mg/ L)		pH			水温 (°C)	曝 气 池 混 合 液				
曝气池	缺氧 滤池	系统 进水	二沉池	总出水		SV (%)	MLSS平均 (g/ L)	MLVSS平均 (g/ L)	$f = \frac{MLVSS}{MLSS}$	SVI (mL/ g)
2.0~3.5	<0.5	6.7~7.2	6.4~6.7	6.4~6.7	22.0~31.0	20~25	2.91	2.59	0.89	77.2~96.5

试验数据汇总表

表5

日期	正交 试验号	操作条件		COD _{Cr} (mg/ L)					氨氮 (mg/ L)					NO _x - N (mg/ L)				
		HRT _曝 (h)	HRT _滤 (h)	原水		总出水		平均去除率 (%)	原水		总出水		平均去除率 (%)	二沉池出水		总出水		平均去除率 (%)
				范围	均值	范围	均值		范围	均值	范围	均值		范围	均值	范围	均值	
6.22~ 7.1	5	6	2.71	205~384	286	19.2~74.2	43.3	84.9	31.0~42.0	37.4	2.8~9.3	6.3	83.2	18.5~28.0	23.5	9.7~15.0	12.5	46.8
7.2~ 7.8	4	6	1.90	129~284	209	11.4~34.6	23.4	88.8	35.0~28.5	37.2	5.4~10.5	7.3	80.4	14.0~27.0	20.8	10.5~19.5	15.5	25.3
7.8~ 7.16	6	6	3.52	104~199	168	19.5~33.7	27.9	83.4	24.0~30.5	26.8	3.4~10.1	5.9	78.0	10.5~20.5	15.7	5.2~11.0	7.4	52.7
7.17~ 7.23	9	9	3.52	173~223	201	19.3~27.2	23.1	88.5	23.0~35.0	28.3	1.1~10.0	4.9	82.7	15.0~37.0	24.6	5.5~14.0	8.7	64.7
7.24~ 8.2	7	9	1.90	90.6~217	160	15.4~25.2	20.3	87.3	15.8~25.0	20.3	2.5~5.5	3.9	80.8	17.5~28.5	21.8	9.3~12.5	11.2	48.6
8.4~ 8.12	8	9	2.71	156~185	167	16.3~31.7	24.4	85.5	20.5~28.5	23.6	1.6~4.4	3.3	86.0	22.0~24.5	23.5	10.5~11.5	10.9	53.6
8.14~ 8.23	1	4	1.90	119~376	249	15.4~44.0	28.8	88.4	17.5~36.0	23.6	0.5~4.0	2.4	89.8	7.5~26.0	13.6	5.3~15.5	8.7	35.9
8.24~ 8.30	2	4	2.71	104~327	223	14.3~32.8	20.0	91.0	13.0~37.0	28.1	1.2~9.7	3.5	87.5	9.5~18.0	13.8	4.7~9.0	6.4	53.8
8.30~ 9.8	3	4	3.52	158~282	238	11.2~30.0	21.3	91.1	26.0~36.0	30.8	6.8~12.0	9.7	68.5	6.0~10.0		1.1~3.0	2.0	74.4

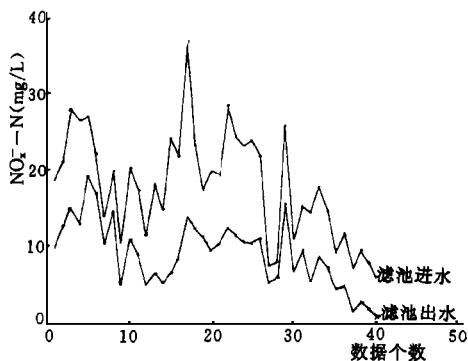


图5 滤池进、出水 NO_x-N 逐日变化图

重复试验数据

表6

因素 试验结果	A ₁		A ₂		A ₃	
	COD _{Cr} 去除率 (%)	NO _x -N 去除率 (%)	COD _{Cr} 去除率 (%)	NO _x -N 去除率 (%)	COD _{Cr} 去除率 (%)	NO _x -N 去除率 (%)
B ₁	84.8	35.4	88.5	25.5	90.0	45.7
	92.1	36.6	89.3	25.0	84.2	52.1
B ₂	91.2	53.5	83.0	43.8	83.1	53.6
	90.9	54.9	86.2	48.5	87.4	53.3
B ₃	90.8	72.6	81.4	49.6	85.4	69.1
	91.3	76.4	86.0	56.3	91.1	61.9

试验表中没有空列,即无误差列。考虑在同一试验条件下试验结果的差异便是试验误差,所以方差分析按重复试验的方差分析方法进行^[6]。为便于方差分析,将每组正交试验的数据按时间顺序分为两组,即认为每组试验重复运行两次。表6中列出了 COD_{Cr} 去除率及 NO_x-N 去除率的重复试验数据。

(1) COD_{Cr} 去除率的方差分析

便于计算,首先将表6中的 COD_{Cr} 去除率 y_{ijk} 作变换 $x_{ijk} = 100y_{ijk} - 80$ 。方差分析结果如表7所示。

由表7可知:各因素对 COD_{Cr} 去除率影响的大小顺序为: A → (A × B) - B。但是,各因素对系统 COD_{Cr} 去除率的影响均不显著,同时,方

COD_{Cr} 去除率方差分析表

表7

来源	离差平方和	自由度	均方离差	F 值	显著性	临界值
因素A	64.12	2	32.06	3.39	有一定影响	$F_{0.05}(2,9)=4.26$
因素B	4.23	2	2.12	0.22		$F_{0.05}(4,9)=3.63$
A × B	44.82	4	11.21	1.18		$F_{0.1}(2,9)=3.01$
误差	85.15	9	9.46			$F_{0.1}(4,9)=2.69$
总和	198.39	17				

差分析表中误差项的均方离差值较大,说明系统受其它因素,诸如:进水浓度、生物活性等因素的影响。

2) $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率的方差分析

以 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率为考察指标对正交试验结果进行方差分析,首先对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率 y_{ijk} 作变换 $x_{ijk} = 100y_{ijk}$ 。方差分析结果如表 8 所示。

来源	离差平方和	自由度	均方离差	F 值	显著性	临界值
因素 A	784.50	2	392.25	39.67	**	$F_{0.01}(2,9)=8.02$
因素 B	2287.56	2	1143.78	115.69	**	
A × B	324.06	4	81.02	8.19	**	
误差	88.98	9	9.89			$F_{0.01}(4,9)=6.42$
总和	3485.10	17				

由表 8 可知,因素 A、B 及其交互作用对系统的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率均有高度显著性影响,其影响大小顺序依次为: $B \rightarrow A \rightarrow (A \times B)$ 。

3) 方差分析小结

通过方差分析进一步明确了各因素对 COD_{Cr} 及 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率影响的显著性。因素 A 对 COD_{Cr} 去除率有一定影响,其最佳水平为 A_1 ,由于因素 B 及 A、B 的交互作用对 COD_{Cr} 去除率均无显著性影响,所以,对于系统的 COD_{Cr} 去除率而言,可选 A_1 与因素 B 的任一水平进行组合。对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率而言,从表 6 可知,因素 A、B 的最佳水平分别为 A_3 、 B_3 ,最佳水平组合为 A_1 、 B_3 (即 $\text{HRT}_{\text{曝}}=4\text{h}$ 、 $\text{HRT}_{\text{滤}}=3.52\text{h}$)。

三、系统的验证试验及出水回用的可行性分析

通过前期正交试验得出了“活性污泥-缺氧变速生物滤池”城市污水深度处理系统的最佳运行条件。为进一步验证正交试验分析结果的可靠性和分析系统出水回用的可行性,在 $\text{HRT}_{\text{曝}}=4\text{h}$ 、 $\text{HRT}_{\text{滤}}=3.52\text{h}$ 的条件下,又进行了两周试验,试验中加测了出水色度、浊度、大肠菌群数,其结果如表 9 所示。

对照国家环保局 (GB5084-92)《农田灌溉水质标准》及建设部 (CJ 25.1-89)《生活杂用水水质标准》可知:“活性污泥-缺氧变速生物滤

项 目	出水水质
COD_{Cr} (mg/L)	26.6
SS (mg/L)	< 10
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (mg/L)	4.9
$\text{NO}_x^- - \text{N}$ (mg/L)	9.2
碱度 (mgCaCO ₃ /L)	110~185
pH	6.4~6.7
臭味	无不快感觉
大肠菌群数 (个/L)	20
浊度 (度)	< 4.0
色度 (度)	< 25

池系统出水符合农田灌溉水质标准,亦基本符合对城市生活杂用水的要求,但出水中大肠菌群数超出标准规定,因此,若将此系统出水用作生活杂用水需进行消毒处理。

四、结论

1. 以系统 COD_{Cr} 去除率及 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率为考察指标时,“活性污泥-缺氧变速生物滤池”系统的最佳运行条件为 $\text{HRT}_{\text{曝}}=4\text{h}$ 、 $\text{HRT}_{\text{滤}}=3.52\text{h}$,在此条件下,系统 COD_{Cr} 去除率在 90%以上, $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率在 70%以上。

2. 以 COD_{Cr} 去除率为考察指标时,因素对系统处理效果的影响顺序为 $A \rightarrow (A \times B) \rightarrow B$,但其影响均不显著。

3. 以 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率为考察指标时,因素对系统处理效果的影响大小顺序为 $B \rightarrow A \rightarrow (A \times B)$,均为高度显著性影响。

4. 系统出水可用于农田灌溉,消毒后可用作城市生活杂用水。

参考文献

- [1] Mogens Henze et al, "Rising Sludge in Secondary Settlers Due to Denitrification", Wat. Res., Vol. 27, No. 2, 1993.
- [2] 俞汉青, "生物转盘去除废水中硝酸氮和含碳有机物的试验研究", 《环境工程》, Vol. 9, No. 5, 1991.
- [3] 杜教林等, "用正交试验法确定生物脱氮系统的主要影响因素", 《环境科学》, Vol. 9, No. 5, 1988.
- [4] 北京市市政工程设计研究总院主编, 《简明排水设计手册》, 中国建筑工业出版社, 1990.
- [5] 汪荣鑫, 《数理统计》, 西安交通大学出版社, 1986.
- [6] 田胜元等, 《实验设计与数据处理》, 中国建筑工业出版社, 1988.

★作者通讯处: 630045 重庆建筑大学城建学院
电话: (0811) 5311981-2300 (O), 5235 (H)
收稿日期: 1996-9-16