

厌氧流化床下向流布水装置结构型式 的 试 验 研 究 (II)

(以最大容积有效利用率为考察指标)

龙腾锐 郭劲松

(城建系)

摘 要 本文以最大容积有效利用率为考察指标,在相同膨胀高度和相同回流量条件下,用正交试验和数理统计的分析方法,对下向流布水装置的结构组合型式进行了优化试验研究。得到了布水装置工况影响因素的重要性顺序和显著性因素,以及最佳布水装置的结构组合型式。

关键词 厌氧流化床 下向流布水装置, 环境污染, 废水处理

在研究厌氧流化床下向流布水装置最佳结构型式中,曾以最小启动回流量(最低能耗)为考察指标得出了最佳结构组合型式^[1]。但是,评价一个废水处理反应器的性能,除了着眼于它的处理效果好和能耗低之外,还应该考虑反应器的容积是否省。因此本文以最大容积有效利用率为考察指标,采用多因素正交试验及统计分析方法来研究布水装置的最佳结构型式。试验因素、因素水平、正交试验表的安排以及试验用的装置及流程,都与以最小启动回流量为考察指标时的完全一样^[1]。

1 试验原理与考察指标

已有试验表明,本试验装置中水流流态属完全混合型^[2]。根据理论推导,这种理想流型反应器的累积液龄分布函数可写为^[3]:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (1)$$

式中: $F(t)$ ——累积液龄分布函数;

- t —— 试验停留时间;
 V' —— 反应器计算容积;
 Q —— 进水流量。

在实际反应器中, 由于反应器体积大, 难免出现死角和沟流, 因此, 实际反应器中的流型总是偏离理想流型, 其偏离的程度一般通过试验用上述液龄分布函数来确定。实测液龄分布函数中的指数值应当是 $(Q/V')t$ (Q 为进水流量, V' 为水流实际利用了的反应器容积)。这样, V'/V (V 为反应器计算容积) 便为反应器容积有效利用率。

本试验研究采用食盐作为示踪剂的自来水配制进水, 在时间 $t=0$ 时进水示踪剂浓度从 0 瞬时增至 C_0 , 然后保持恒定不变的阶跃信号输入示踪剂。由于浓度 C_0 不变, 则试验时间 t 时的出水浓度 C_t 与进水浓度 C_0 的比值 (C_t/C_0) 按定义即为累积液龄分布函数 $F(t)$ ^[3]。本试验用 DDS-11 型电导仪测定的进、出水电导值表示进、出水中示踪剂的浓度。因为在试验过程中, 食盐及电导仪的物理、化学特性均未改变, 所以有:

$$F(t) = \frac{C_t}{C_0} = \frac{L_t - L_1}{L_0 - L_1} \quad (2)$$

式中: C_0, C_t —— 进、出水中食盐的浓度;
 L_0, L_t —— 进、出水电导值;
 L_1 —— 自来水电导值。

将 (2) 式代入 (1) 式并整理可得:

$$\frac{L_0 - L_t}{L_0 - L_1} = e^{-\frac{Q}{V'}t} \quad (3)$$

所以, 试验数据按 (3) 式处理可求得流化床实际被利用的容积 V' , 再求出容积有效利用率 V'/V 。很显然, 反应器应以容积有效利用率高者为优。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

按照 $L_{27}(3^{13})$ 正交试验表^[1]的安排分为膨胀高度相同 (55.5cm) 和回流量相同 (0.75 m³/h) 两种情形进行试验。对于试验所得的两千多个原始数据, 用数理统计中的拉依达法对数据的可靠性进行判断, 剔除了其中的异常数据^[4], 同时用拉格朗日插值法^[5]对原始数据中的空缺和漏值进行插补, 以保证试验数据的完备性。经上述预处理后的试验数据按 (3) 式计算得出本试验装置的容积有效利用率, 其结果列于表 1 和表 2 中。

2.2 结果分析

2.2.1 试验结果的极差分析

1) 表 3 系在相同膨胀高度条件下, 根据表 1 所作的容积有效利用率极差分析表。图 1 系利用表 3 中的 k_1, k_2, k_3 所作的容积有效利用率与单因素的关系图。表 4 和表 5 分别为 AB 交互作用和 BD 交互作用的二元分析表, 图 2 为其相应的二元分析图。

由表 3 可知, 按极差大小排列的因素重要性顺序为: $(B \times D)_2, E, (A \times B), A, D, C, B$ 。由图 1 可得出, 各单因素的最佳水平为: A_2, B_3, C_2, D_2, E_3 。

表1 相同膨胀高度(55.5cm)时的容积有效利用率

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
水平组合	$A_1B_1C_1D_1E_1$	$A_1B_1C_2D_2E_2$	$A_1B_1C_3D_3E_3$	$A_1B_2C_1D_3E_3$	$A_1B_2C_2D_1E_3$	$A_1B_2C_3D_2E_1$	$A_1B_3C_1D_2E_3$	$A_1B_3C_2D_3E_1$	$A_1B_3C_3D_1E_2$
试验值 (%)	83.30	80.67	90.86	77.60	88.42	89.12	84.27	77.12	74.29
简化值 (%)	13.30	10.67	20.86	7.60	18.42	19.12	14.27	7.12	4.29
试验号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
水平组合	$A_2B_1C_2D_1E_2$	$A_2B_1C_3D_2E_3$	$A_2B_1C_1D_3E_1$	$A_2B_2C_2D_3E_3$	$A_2B_2C_3D_1E_1$	$A_2B_2C_1D_2E_2$	$A_2B_3C_2D_2E_1$	$A_2B_3C_3D_3E_1$	$A_2B_3C_1D_1E_3$
试验值 (%)	81.12	81.65	82.37	85.44	87.12	80.32	98.0	82.61	92.16
简化值 (%)	11.12	11.65	12.37	15.44	17.12	10.32	28.0	12.61	22.16
试验号	19	20	21	22	23	24	25	26	27
水平组合	$A_3B_1C_3D_1E_3$	$A_3B_1C_1D_2E_1$	$A_3B_1C_2D_3E_2$	$A_3B_2C_3D_3E_1$	$A_3B_2C_1D_1E_2$	$A_3B_2C_2D_2E_3$	$A_3B_3C_3D_2E_2$	$A_3B_3C_1D_3E_3$	$A_3B_3C_2D_1E_1$
试验值 (%)	83.71	78.45	81.24	77.82	80.86	88.15	87.79	88.52	79.16
简化值 (%)	13.71	8.45	11.24	7.82	10.86	18.15	17.79	13.52	9.16

* 简化值 = 试验值 - 70.0, 简化的目的是为了在方案分析时更方便, 在后面的分析中除特别注明外, 皆是用简化值进行的。

表2 相同回流量(0.75m³/h)时的容积有效利用率

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
水平组合	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ L ₁	A ₁ B ₁ C ₂ D ₂ F ₂	A ₁ B ₁ C ₃ D ₃ F ₃	A ₁ B ₂ C ₁ D ₃ E ₂	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁ F ₃	A ₁ B ₂ C ₃ D ₂ F ₁	A ₁ B ₃ C ₁ D ₂ L ₃	A ₁ B ₃ C ₂ D ₃ L ₁	A ₁ B ₃ C ₃ D ₁ L ₂
试验值 (%)	79.14	82.37	84.10	77.60	79.56	84.67	77.76	89.50	79.23
简化值 (%)	9.14	12.37	14.10	7.60	9.56	14.07	7.76	16.50	9.22
试验号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
水平组合	A ₂ B ₁ C ₂ D ₁ E ₂	A ₂ B ₁ C ₃ D ₂ E ₃	A ₂ B ₁ C ₁ D ₃ F ₁	A ₂ B ₂ C ₂ D ₃ F ₃	A ₂ B ₂ C ₃ D ₁ F ₁	A ₂ B ₂ C ₁ D ₂ F ₂	A ₂ B ₃ C ₂ D ₂ F ₁	A ₂ B ₃ C ₃ D ₃ F ₁	A ₂ B ₃ C ₁ D ₁ F ₃
试验值 (%)	75.51	79.39	83.15	82.91	87.12	76.26	93.01	83.05	81.45
简化值 (%)	5.51	9.39	13.15	12.91	17.12	6.26	33.01	12.05	11.45
试验号	19	20	21	22	23	24	25	26	27
水平组合	A ₃ B ₁ C ₃ D ₁ L ₃	A ₃ B ₁ C ₁ D ₂ E ₁	A ₃ B ₁ C ₂ D ₃ F ₂	A ₃ B ₂ C ₃ D ₃ F ₁	A ₃ B ₂ C ₁ D ₁ F ₂	A ₃ B ₂ C ₂ D ₂ F ₃	A ₃ B ₃ C ₃ D ₂ L ₂	A ₃ B ₃ C ₁ D ₃ F ₃	A ₃ B ₃ C ₂ D ₁ L ₁
试验值 (%)	78.70	72.21	82.56	79.08	75.79	83.12	78.10	84.93	88.16
简化值 (%)	8.70	2.21	12.56	9.08	5.79	13.12	8.40	14.93	18.16

* 简化值 = 试验值 - 70.0, 简化的目的是为了在方差分析时更方便。在后面的分析中, 除特别注明外, 皆是用简化值进行的。

表3 相同膨胀高度(55.5cm)时容积有效利用率极差分析表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
因素	A	B	(A×B) ₁	(A×B) ₂	(B×C) ₁	C	(B×D) ₂	D	E				
K _I	115.65	113.37	144.43	128.18	139.05	112.85	107.42	118.97	120.14	132.16	118.56	128.93	120.82
K _{II}	140.79	124.85	120.75	111.31	110.42	129.32	116.83	97.21	138.42	96.50	118.21	125.42	127.04
K _{III}	110.70	128.92	101.96	97.65	127.67	124.97	112.89	150.93	108.58	148.18	130.37	113.93	119.28
k ₁	12.85	12.60	16.05	11.24	14.24	12.54	11.94	13.22	13.35	13.61	13.17	14.39	13.42
k ₂	15.64	13.87	13.42	15.70	12.27	14.37	12.98	10.80	15.38	10.72	13.13	13.94	14.12
k ₃	12.30	14.32	11.33	10.25	14.19	13.63	15.88	16.77	12.06	16.46	14.48	12.56	13.25
极差R	3.34	1.72	4.72	4.85	2.07	1.83	3.94	5.97	3.32	5.74	1.36	1.74	0.37

· K_I, K_{II}, K_{III}分别表示各因素1, 2, 3水平下容积有效利用率之和。k₁, k₂, k₃分别表示各因素1, 2, 3水平下容积有效利用率的平均值。

表4 相同膨胀高度(55.5cm)时(A×B)交互作用二元分析表

因素	因素		
k 值	B ₁	B ₂	B ₃
因素			
A ₁	14.94	15.05	8.50
A ₂	11.71	14.29	20.92
A ₃	11.13	12.28	13.49

表5 相同膨胀高度(55.5cm)时(B×D)交互作用二元分析表

因素	因素		
k 值	D ₁	D ₂	D ₃
因素			
B ₁	12.71	10.26	14.82
B ₂	15.47	15.86	10.92
B ₃	11.87	20.02	11.08

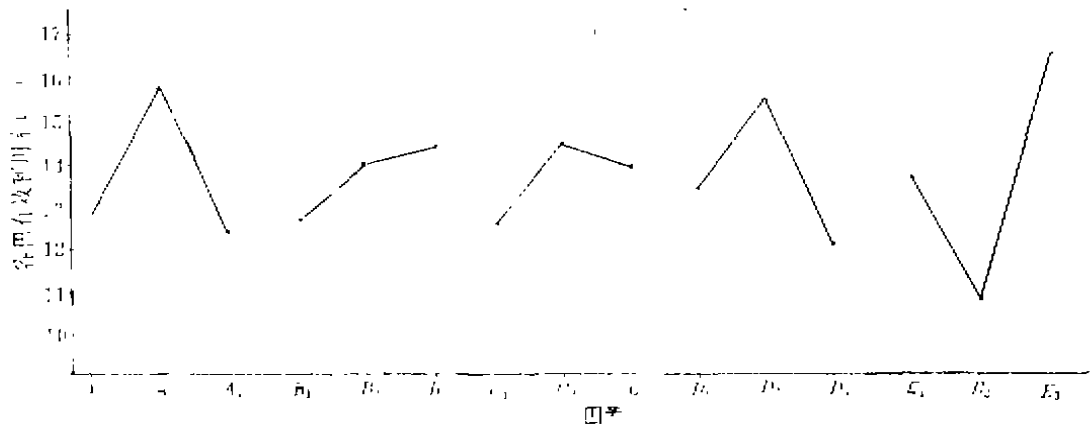


图1 相同膨胀高度(55.5cm)时, 容积有效利用率~单因素图

由二元分析表4及表5可知：对于交互作用AB，水平组合的优劣顺序为 $A_2B_3, A_1B_2, A_1B_1, \dots, A_3B_1, A_1B_3$ ；对于交互作用BD，水平组合的优劣顺序为 $B_3D_2, B_2D_2, B_2D_1, \dots, B_1D_2$ 。同时考虑单因素的最佳水平和交互作用水平组合，可以得出，在相同膨胀高度(55.5cm)条件下，最佳布水装置结构组合为： $A_2B_3C_2D_2E_3$ 。

2) 同理，在相同回流量(0.75 m³/h)条件下，根据表2的结果作容积有效利用率极差分析列于表6。图3为按表6所作的容积有效利用率与单因素的关系图。同时对交互作用

AB和BD分别作二元分析表7和表8，图4为根据表7和表8所作的容积有效利用率二元分析图。分析这些图、表可以得出，在相同回流量(0.75m³/h)条件下，最佳布水装置结构

表6 相同回流量(0.75m³/h)时容积有效利用率极差分析表

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
因素	A	B	(A×B) ₁	(A×B) ₂	(B×D) ₁	C	(B×D) ₂	D	E				
K _I	100.92	87.13	111.11	113.39	92.11	78.29	112.76	101.88	94.65	123.04	103.15	100.81	90.76
K _{II}	111.35	96.11	101.37	102.81	100.92	123.70	84.43	92.39	97.19	80.76	106.56	119.22	105.45
K _{III}	92.95	122.48	93.24	89.62	112.69	103.73	108.53	111.45	113.88	101.92	96.01	85.69	109.51
k ₁	11.21	9.68	12.35	12.60	10.23	8.70	12.53	11.32	10.52	13.67	11.46	11.20	10.08
k ₂	12.43	10.68	11.26	11.42	11.21	13.74	9.38	10.27	10.80	8.97	11.84	13.25	11.72
k ₃	10.33	13.61	10.36	9.95	12.52	11.53	12.06	13.38	12.65	11.32	10.67	9.52	12.17
极差R	2.10	3.93	1.99	2.65	2.29	5.04	3.16	2.11	2.13	4.70	1.17	3.73	2.09

* K_I, K_{II}, K_{III}分别表示各因素1, 2, 3水平下容积有效利用率之和。k₁, k₂, k₃分别表示各因素1, 2, 3水平下容积有效利用率的平均值。

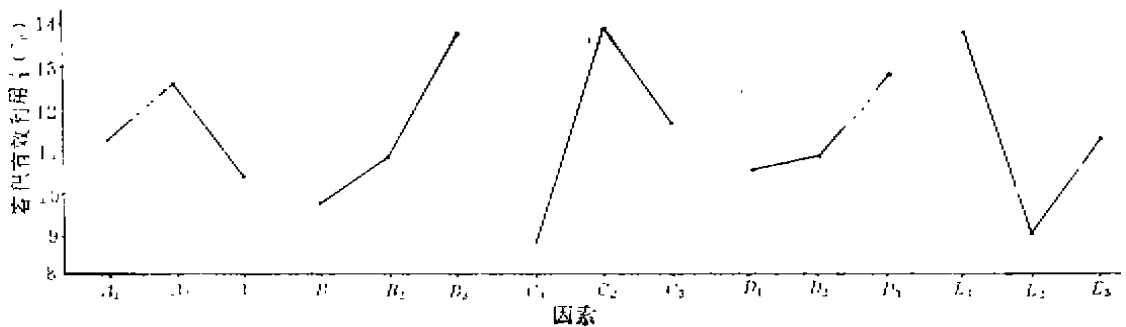


图3 相同回流量时(0.75m³/h)，容积有效利用率~单因素图

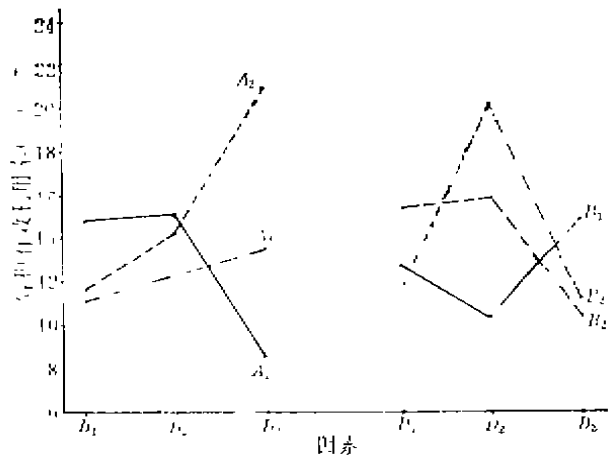


图2 相同膨胀高度(55.5cm)时，(A×B) (B×D) 二元分析图

组合为： $A_2B_3C_2D_3E_1$ 。

2.2.2 试验结果的方差分析

上述极差分析获得了各因素的重要性顺序，为了了解各因素的重要性程度，需要对试验数据进行方差分析^[5]。

表7 相同回流量(0.75m³/h)时 (A×B)交互作用二元分析表

因素 \ k 值	B ₁	B ₂	B ₃
A ₁	11.87	10.61	11.16
A ₂	9.35	12.10	15.84
A ₃	7.82	9.33	13.83

表8 相同回流量(0.75m³/h)时 (B×D)交互作用二元分析表

因素 \ k 值	D ₁	D ₂	D ₃
B ₁	7.78	7.99	13.27
B ₂	10.82	11.35	9.86
B ₃	12.94	13.26	14.83

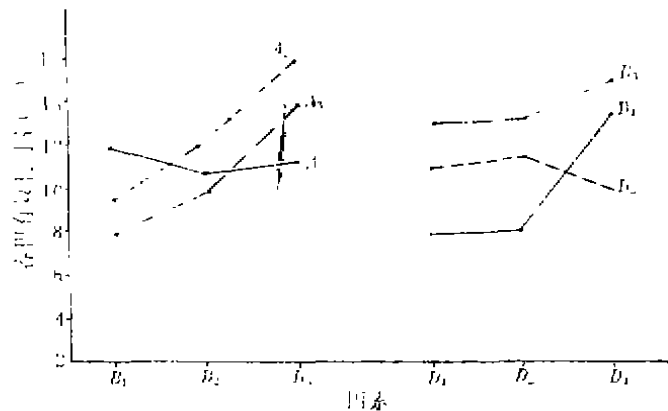


图4 相同回流量(0.75m³/h)时, (A×B)二元分析图, (B×D)二元分析图

1) 在相同膨胀高度条件下，容积有效利用率方差分析计算结果列于表9。由表9可知，因素A，E以及交互作用AB和BD在显著水平 $\alpha = 5\%$ 时，对容积有效利用率有显著影响。因素D在显著水平 $\alpha = 10\%$ 时才有显著影响。因此可以认为：A，E，(A×B)，(B×D)对容积有效利用率影响较大，因素D影响一般，而因素C，B则影响较小。

2) 在相同回流量(0.75m³/h)条件下，容积有效利用率方差分析计算结果列于表10。由表10可知，在显著水平 $\alpha = 5\%$ 时，没有因素对容积有效利用率有显著影响。只有因素E和C在显著水平 $\alpha = 10\%$ 时，对容积有效利用率有一定影响。

表11系载体膨胀刚达到强制膨胀高度(55.5cm)时，所需要的最小回流量。

从表11可以看出，有70%左右的试验号，其载体膨胀至强制膨胀高度所需要的回流量小于0.75m³/h。这说明，在达到强制膨胀高度使载体形成内循环以后，再增加回流量，布水装置的结构因素对容积有效利用率的影响减小，只有因素E和C有一定的影响。

表11 载体膨胀至强制膨胀高度(55.5cm)所需最小回流量

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
回流量 m ³ /h	0.45	0.38	0.45	0.75	0.56	0.67	0.53	0.50	0.55	0.53	0.45	0.55	0.715	0.75	0.81	0.61	0.69
试验号	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27							
回流量 m ³ /h	0.65	0.725	0.72	0.75	0.97	1.00	0.98	0.87	0.91	0.85							

2.2.3 显著影响的多重比较

由方差分析得出,无论在何种试验条件下,因素E总是显著因素。为了确定该因素各水平之间的差异程度,对其进行多重比较^[6]。

因素E的水平数为 $r=3$,各水平的试验次数 $m=9$,误差均方差 $S_e=5.6821$,误差自由度 $\phi=8$,根据 q 分布表^[7],查得 $q_{0.05}(3, 8)=4.04$,则显著区域为:

$$d_T = q_{0.05}(3, 8) \times \sqrt{\frac{S_e}{m}} = 4.04 \times \sqrt{\frac{5.6821}{9}} = 3.21$$

由表3可知 $k_1=13.61$; $k_2=10.72$; $k_3=16.46$ 则

$$d_{12} = |k_1 - k_2| = |13.61 - 10.72| = 2.89 < d_T$$

$$d_{13} = |k_1 - k_3| = |13.61 - 16.46| = 2.85 < d_T$$

$$d_{23} = |k_2 - k_3| = |10.72 - 16.46| = 5.74 > d_T$$

从以上检验得知:因素E的1~2水平和1~3水平之间没有显著差异,可以相互替代。而2~3水平之间有显著差异,不能相互替代。

3 结论

综合前面的分析,可得以下结论:

1) 对容积有效利用率而言,下向流布水装置结构因素的重要性顺序为:循环缝高、导流筒内径、喷口直径、喉口直径和喷口安装高度。

2) 循环缝高(因素E)对容积有效利用率影响最显著($\alpha=5\%$),说明循环缝设计十分重要,同时它的2~3水平之间不可相互替代。

3) 以最大容积有效利用率为考察指标时,在相同膨胀高度(55.5cm)试验条件下,厌氧流化床下向流布水装置的最佳结构组合为: $A_2B_3C_2D_2E_3$;在相同回流量($0.75\text{m}^3/\text{h}$)试验条件下,厌氧流化床下向流布水装置的最佳结构组合为: $A_2B_3C_2D_3E_1$ 。

参 考 文 献

- 1 龙腾锐、郭劲松. 厌氧流化床下向流布水装置结构型式的优化试验研究(I). 重庆建筑工程学院学报, 1991, 13(3)
- 2 龙腾锐等. 厌氧流化床水力混合特性的研究. 重庆环境科学, 1989, 11(4)
- 3 许保玖. 当代给水与废水处理原理讲义. 清华大学出版社, 1982
- 4 白新柱. 数据分析与试验优化设计. 清华大学出版社, 1986
- 5 田世元、陈日隆. 实验设计与数据处理. 中国建筑工业出版社, 1983

- 6 中国科学院数学研究所统计组编。方差分析。科学出版社，1977
7 中国科学院数学研究所统计室编。常用数理统计表。科学出版社，1979

(编辑：刘家凯)

RESEARCH ON THE STRUCTURE OF DOWNFLOW WASTEWATER DISTRIBUTORS IN AN ANAEROBIC FLUIDIZED BED(II)

(With the object of maximum useful volume efficiency)

Long Tengrui *Guo Jingsong*

(Dept. of Urban Construction Engineering)

ABSTRACT In this paper, with the object of maximum useful volume efficiency, the optimization of structures of downflow wastewater distributors in an anaerobic fluidized bed under the condition of same expansion height and same return flow rate is studied by means of orthogonal test and statistical analysis. The sequence of importance of the factors affecting the performance of the distributors is given and the optimum structure of downflow wastewater distributors is obtained.

KEY WORDS anaerobic fluidized bed, downflow wastewater distributor, environmental pollution, wastewater treatment