

内循环生物流化床反应器载体挂膜特性的研究

周 平* 何嘉汉 钱 易

(清华大学环境工程系 环境模拟与污染控制国家重点实验室,北京 100084)

摘要 分别考察了水力停留时间、反应器结构、接种污泥量及载体粒径等因素对内循环三相生物流化床反应器载体挂膜的影响。试验结果表明,较短的停留时间、较小的内循环速度、较少的接种污泥量及较小粒径的载体有利于反应器的快速挂膜启动。

关键词 内循环生物流化床;挂膜;悬浮生物量;附着生物量。

内循环三相生物流化床反应器是一种新型的生物膜法工艺,但其中载体的挂膜过程与传统生物膜法相比有以下几点不同:①载体的比表面积大;②流体紊动所造成的剪切作用大;③载体接近球形。研究内循环生物流化床的启动挂膜规律对于迅速地发挥反应器高生物浓度的优势具有重要意义。

1 试验装置及材料

试验装置流程如图 1 所示。采用 3 个不同结构的内循环生物流化床,分别称为 R1、R2、R3,其中心管直径 D_r 、反应器外径 D_d 、有效高度 H 、体积 V 如表 1 所示。分别采用粒径为 0.25—0.5mm 和 0.5—0.71mm 的陶粒作为载体。为了更好地控制试验研究条件,分别采用生活污水和人工配制废水作为基质,其中人工配制废水按 COD:N:P=100:5:1 的比例分别投加葡萄糖、硫酸铵和磷酸二氢钠作为 C、N 和 P 源。

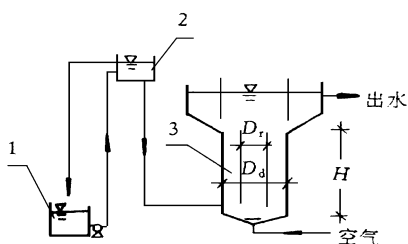


图 1 试验装置流程图

1. 配水箱 2. 高位水箱
3. 内循环生物流化床

Fig. 1 Scheme of the experimental installation

表 1 试验所用反应器尺寸

Table 1 Geometry details of internal-loop biofluidised bed

反应器	D_r , cm	D_d , cm	H , m	V , L
R1	7	15	0.95	16.7
R2	10	15	0.95	16.7
R3	10	15	1.9	33.0

2 试验结果分析与讨论

2.1 水力停留时间 HRT 对载体挂膜的影响

本试验在 R3 中进行,所用废水为人工配制废水,载体粒径为 0.5—0.71mm。在反应器中投加载体 2.5kg 及浓度约为 2g/L 的接种污泥时进闷曝培养,两天后开始连续进水。在 3 个不

* 现在南京大学环科系工作

同水力停留时间 HRT 下进行挂膜试验:第一次挂膜 HRT 为 5h,进水 COD 1500mg/L 左右,去除容积负荷 N_V 约 COD 7kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),供气量 Q_g 0.3 m^3/h ,历时 22d;第二次挂膜 HRT 为 2.2h,将原先反应器中污泥放空,保留原载体(此时载体上无生物膜形成),而后投入约 2g/L 的接种污泥,进水 COD 1000mg/L 左右, N_V 为 COD 10kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$), Q_g 增至 0.4 m^3/h ,历时 15d;第三次挂膜 HRT 为 0.55h,排空原先的载体和污泥后加入新的载体和污泥,进水 COD 200mg/L 左右, N_V 约为 COD 7kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$), Q_g 0.4 m^3/h ,历时 15d. 不同停留时间下,反应器内载体上附着生长的生物量 X_a 及其占生物总量 X ($X = X_a + X_s$, X_s 为悬浮生长生物量)的百分数 X_a/X 历时变化如图 2 所示,相应的进、出水 COD 及出水 SS 历时变化如图 3 所示.

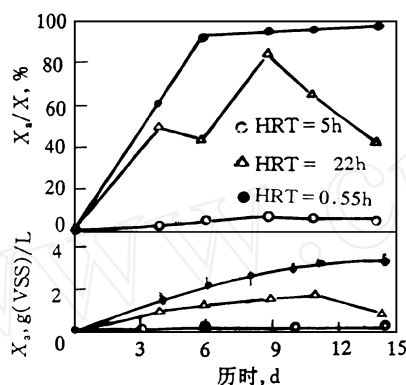


图 2 停留时间对载体挂膜的影响

Fig. 2 Effects of HRT on biofilm formation

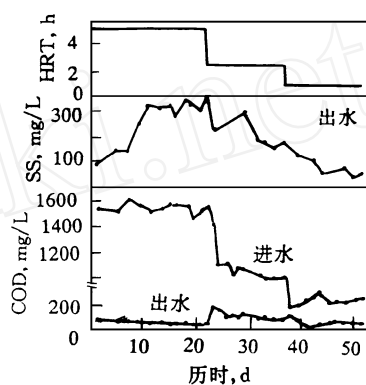


图 3 挂膜期 COD、SS、HRT 历时变化

Fig. 3 Time courses of COD, effluent SS and HRT

第一次挂膜采用较高的进水浓度和较长的 HRT,运行 3d 后可明显地发现反应器内悬浮生物大量增殖,普通显微镜检发现载体上无微生物附着生长,但用扫描电镜可观察到在载体的孔隙内有微生物吸附在其中,即反应器内微生物几乎完全以悬浮状存在,此时平均悬浮污泥浓度为 2.0g(VSS)/L,吸附在载体上的生物量为 0.05g(VSS)/L. 随着运行时间的延长,反应器内平均悬浮生物浓度逐渐稳定在 2.5~2.6g(VSS)/L,而附着在载体上的生物量仅为 0.2g(VSS)/L 左右,不再继续增长,产生的生物量均以悬浮污泥的形式从反应器中随出水流失. 在开始的几天内,出水 SS 并不很高,这是由于内循环流化床的三相分离器对污泥起了截留作用. 随着运行时间的延长,三相分离器中充满了被截留的污泥,故污泥随出水大量流失,高达 350mg/L. 由此可见,采用较长的停留时间(HRT=5h)导致了载体挂膜过程的失败,这是因为当 HRT 较长时,微生物流失量小,悬浮微生物的增长速率大于其流失率,从而可以不断增殖而在反应器内逐渐积累起来. 悬浮的微生物与附着的微生物(生物膜)相比,在生长的竞争过程中更为有利^[1],这是由于附着的微生物易于受到生物膜内传质阻力和底物扩散限制的影响,如图 4 所示.

当微生物在载体表面聚集而形成生物膜后,底物必须首先穿过表层生物膜才能为生物

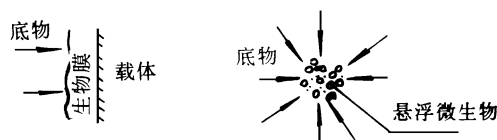


图 4 微生物对底物的摄取

Fig. 4 Biomass utilization of substrate

膜内的微生物所利用,故存在底物扩散限制的问题;而当微生物以悬浮状絮体存在时,由于絮体相对于生物膜来说极小,且呈分散状态存在,每个微生物均可自由地与底物接触,极易摄取底物,因此悬浮生物的生长速率大于附着生物,使悬浮生物量比附着生物量多,其摄取的底物量也比附着生物更多,如此造成一种对附着微生物生长不利的循环.生物流化床良好运行的基本条件是培养出良好的生物膜并减少悬浮生物量,从而发挥高生物浓度的优势.为了使生物膜生长良好,必须采取较短的 HRT,使得悬浮生物的稀释率(Dilution Rate) D_s ($D_s = \frac{1}{HRT}$) 大于其比增长率 $\mu^{[1]}$,此时悬浮生物可被冲出反应器外.由于生物膜在载体表面附着生长,当 HRT 减小时,只要载体不被冲出反应器外,生物膜就不会随出水流失,即附着生物的稀释率 D_a 不随 HRT 的减小而增大,从而即使当 HRT 很小时,其 D_a 仍小于 μ ,附着生物仍可在反应器内增殖.因此,为了使生物膜生长良好,挂膜时必须采取较短的 HRT,以利于附着生物的增长.

在第一次挂膜试验的基础上,将 HRT 缩短为 2.2h,进行第二次挂膜试验,进水 COD 为 1000mg/L 左右.运行 4d 后,通过普通显微镜检即可发现少部分载体的凹处附着生长了微生物,而有些粒径较小的载体已几乎完全被生物膜所包裹,此时反应器内平均附着生物量为 0.8g(VSS)/L,悬浮生物量亦为 0.8g(VSS)/L.第 6d 即可发现几乎每个载体上都有一层薄薄的生物膜,此时 X_a 为 1.4g(VSS)/L, X_s 为 1.5g(VSS)/L,即悬浮生物量仍大于附着生物量, X_a/X 由两天前的 50%下降至 42.8%.第 7d 将悬浮污泥排除,第 9d X_a 为 1.5g(VSS)/L, X_s 为 0.35g(VSS)/L,而 2d 后又发现悬浮生物增长到 0.93g(VSS)/L, X_a/X 又下降到 66%.到第 14d X_a 减少至 0.72g(VSS)/L,而 X_s 增至 1.0g(VSS)/L, X_a/X 下降至 42%.由此可见,当 HRT 缩短至 2.2h 时,载体的挂膜状况得到了明显的改善,但随着时间的延长,悬浮生物又得以较快的增殖,对附着生物膜的生长不利,必须不停地排走悬浮污泥,生物膜才能进一步增长.第二次挂膜过程中生物量的增长及进、出水 COD、出水 SS 的变化分别如图 2、3 所示.

第三次挂膜试验前将反应器中的悬浮污泥及载体全部排出,并清洗反应器.进水 COD 为 200mg/L 左右,HRT 进一步减小至 0.55h,运行 3d 后即可发现载体上有钟虫附着生长,第 4d 观察到一些载体上有大量的钟虫,此时 X_a 达 1.4g(VSS)/L,占总生物量的 60%.运行第 6d,可见有的载体上有大量的钟虫、丝状菌,生物膜已逐渐形成, X_a 为 2.2g(VSS)/L, X_a/X 为 92%.至第 14d, X_a 达 3.4g(VSS)/L,占生物总量的 98%以上,表明挂膜过程业已完成,此时形成的成熟生物膜密实、淡黄色、透明,而幼生的生物膜呈白色而透明.由此可见,采用较短的 HRT 可使悬浮的生物大部份被冲出反应器外,有利于生物膜的形成.由图 2、3 可见,随着运行时间的延长, X_a 逐渐增大,微生物主要以附着生物膜的形式存在,同时出水 SS 逐渐减小.

表 2 不同 HRT 对载体挂膜的影响
Table 2 Effects of HRT on biofilm formation

HRT, h	进水 COD, mg/L	N_v , kg(COD)/(m ³ ·d)	挂膜状况
5	1500	7	差
2.2	1000	10	较差
0.55	200	7	良好

采用不同停留时间的三个阶段,载体挂膜的状况如表 2 所示.由表可见,在三个不同阶段,HRT 逐渐减小,进水 COD 也同时减小,去除容积负荷 N_v 变化不大,而载体挂膜状况逐渐变好,由于进水 COD 的减小不可能有助于载体的挂膜,故可以断定 HRT 的减小是促进载体挂膜的主要因素.

2.2 反应器结构对载体挂膜的影响

同时在 R1、R2、R3 反应器中进行了挂膜试验,以确定不同的反应器结构对载体挂膜的影响.采用粒径为 0.50—0.71mm 的陶粒作为载体,考虑到 R3 的体积为 R1、R2 的 2 倍,故 R1

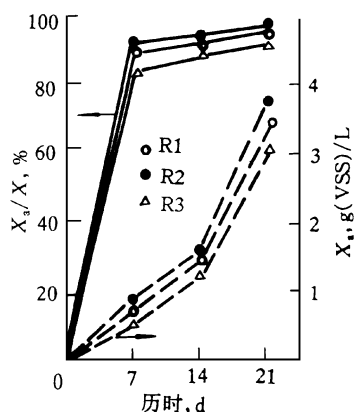


图 5 反应器结构对载体挂膜的影响
Fig. 5 Effects of the reactor structures
on biofilm formation

与 R2 中各投加载体 1.5kg, R3 中投加 3.0kg, 试验所用废水为生活污水. HRT 均控制在 0.5h, R1 的供气量 Q_g 为 $0.45\text{m}^3/\text{h}$, R2 与 R3 的 Q_g 均为 $0.9\text{m}^3/\text{h}$, 相应的升流区表观气速 u_g 均为 3.2cm/s (u_g 为 Q_g 与升流区截面积之比). 试验结果如图 5 所示.

由图可见,在 3 个不同结构的反应器中,当升流区表观气速相同时, R2 的载体挂膜状况最好, R1 其次, R3 又次之. 造成这种差别的原因在于反应器内液体循环速度的差别, 当 u_g 相同时, 内循环速度 u 的大小次序为 $R3 > R1 > R2$, 液体循环速率大, 则载体所受的流体紊动剪切作用大, 不利于生物膜在载体表面的附着生长. 图 5 也表明, 尽管循环速度对载体挂膜有一定影响, 但 R1、R2、R3 三个反应器的差别并不大.

2.3 接种污泥浓度对载体挂膜的影响

本试验在 R1 反应器中进行, 所用废水为生活污水, HRT 维持 0.5h, Q_g 为 $0.4\text{m}^3/\text{h}$. 采用粒径为 0.5—0.71mm 的载体, 投加量 1.5kg. 两次试验的起始接种污泥浓度 C 分别为 3g(VSS)/L 和 1g(VSS)/L . 反应器内载体上附着生物量 X_a 及其占总生物量的百分数随运行时间的变化如图 6 所示.

由图可见, 初始接种污泥浓度对载体的挂膜过程有很大的影响. 当接种污泥浓度为 3g(VSS)/L 时, 反应器内微生物有一半以上呈悬浮态形式存在, 而附着生物量仅占极小部分, 即使在挂膜运行 17d 后, 附着的生物膜仅占总生物浓度的 53.7%; 而当接种污泥浓度为 1g(VSS)/L 时, 在运行 5d 后, 反应器内的微生物即主要以生物膜的形式存在, 而悬浮生物量仅占极小部分. 上述结果表明, 进行内循环三相生物流化床挂膜时, 初始污泥接种量较少, 对附着微生物与悬浮微生物的竞争有利; 而当接种污泥量较大时, 初始的大量悬浮微生物会抑制生物膜的生长, 使得生物膜的增长较为缓慢. 在随后的运行中, 可以发现悬浮生物浓度稳定在 1.3g(VSS)/L 上下, X_a/X 则约为 53%.

根据以上试验结果, 在实际工程中当内循环流化床启动挂膜时, 接种污泥量不能很多, 以 1g(VSS)/L 左右为宜, 这样一方面可节省运输和投加污泥的费用, 另一方面有利于载体的挂膜. 在处理生活污水时, 接种污泥量可否进一步减少, 甚至不投加接种污泥, 反应器能否完成自身启动挂膜? 这是一个值得进一步研究的问题.

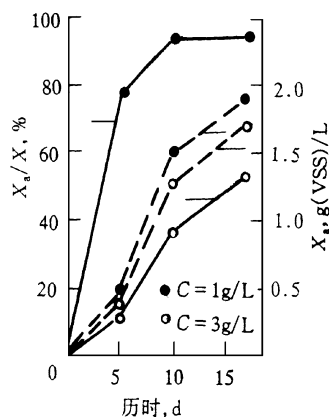


图 6 接种污泥浓度对载体挂膜的影响
Fig. 6 Effects of sludge inoculation concentration
on biofilm formation

2.4 载体粒径对载体挂膜的影响

在 R1 反应器中分别采用粒径为 0.25—0.5mm 和 0.5—0.71mm 的陶粒载体,投加量均为 1.5kg,接种污泥浓度约 1g(VSS)/L,供气量 Q_g 为 0.4m³/h,HRT 0.5h,采用生活污水为基质,进行载体粒径对挂膜影响的试验,结果如图 7 所示。

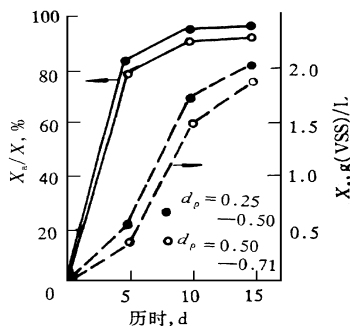


图 7 载体粒径对载体挂膜的影响

Fig. 7 Effects of carrier diameter on biofilm formation

由图可见,采用较小粒径的载体有利于生物膜的生长。这是因为在内循环流化床反应器内,载体受到的紊动作用可用雷诺数表示如下^[2]:

$$Re = u d_p / \nu \quad (1)$$

式中, u 为液体内循环速度(m/s), d_p 为载体直径(m), ν 为水的粘滞系数(m²/s)。在一般的内循环生物流化床内, Re 的大小约为 10^5 — 10^6 ^[2]。由式(1)可见,较大粒径的载体造成流体雷诺数大,从而形成较强的紊动,使载体之间的相互摩擦碰撞剧烈,不利于生物膜在载体表面的附着生长。采用小粒径的载体除避免以上两个因素外,还具有比表面积大的特点,在挂膜初期可将更多的微生物吸附在载体表面,有利于附着微生物的持续增殖及生物膜的形成。

由图还可看出,两种不同条件下载体挂膜状况差别并不十分大,也许是粒径的差别不够大的缘故。

3 结论

1. 采用较短的水力停留时间、较小的内循环速度、较少的接种污泥量及较小粒径的载体有利于内循环流化床的快速启动挂膜。

2. HRT 及接种污泥量对载体挂膜的影响最大,反应器结构次之(在实际工程中由于反应器高度与本试验差别很大,造成液体内循环速度差别较大,故有可能对载体挂膜产生较大影响),而载体粒径的影响较小。

参 考 文 献

- 1 Tjihuis L *et al.* Formation and growth of heterotrophic aerobic biofilms on small suspended partical in airlift reactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 1994, 44: 595—608
- 2 周 平, 钱 易. 内循环生物流化床反应器的理论分析. *环境科学*, 1995, 16(2): 88—90

1996-03-21 收到原稿
1996-08-23 收到修改稿

BIOFILM FORMATION IN INTERNAL LOOP BIOFLUIDISED BED

Zhou Ping, He Jiahua, Qian Yi

(Department of Environmental Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

ABSTRACT The effects of hydraulic retention time, reactor structure, sludge inoculation concentration and carrier size on biofilm formation on carrier surface in an internal loop biofluidised bed were studied. The results show that shorter HRT, Smaller internal circulation velocity, inoculation concentration and carrier size can be beneficial to the rapid biofilm formation and the start-up of the reactor.

Keywords Internal-loop biofluidised bed, biofilm formation, suspended biomass, attached biomass.