

文章编号:1671-6833(2003)02-0015-04

双循环厌氧反应器的流动及传热研究

马晓建¹, 刘龙飞¹, 孙凤杰¹, 王根灿²

(1. 郑州大学化工学院, 河南 郑州 450002; 2. 许昌工业设备安装总公司, 河南 许昌 461500)

摘 要: 生物反应器是整个生物反应过程的关键设备. 针对厌氧反应过程的特点, 提出了既有内循环系统, 又有外循环系统的厌氧反应器新思路. 介绍了该反应器的结构、流动实验和传热实验. 实验结果表明, 流动稳定后, 外循环流量在 400~1 450 L·h⁻¹ 范围内时, 反应器的内循环流速随外循环流量增大呈指数增长, 当采用夹套换热, 外循环流量在 0~1 300 L·h⁻¹ 范围内, 冷却水流量在 250~750 L·h⁻¹ 范围内时, 传热系数随外循环流量或冷却水流量的增加而线性增大.

关键词: 内循环; 外循环; 厌氧反应器; 流动; 传热
中图分类号: TQ 022.1; TQ 052.5 **文献标识码:** A

0 引言

循环反应器是近年来随着生物反应器的研究发展起来的一种新型反应器, 反应器中增设了导流装置, 使反应器内原来无序的自然循环流动得到了强化, 从而产生了稳定的总体环流. 这种反应器无论在结构还是在能耗方面都优于普通的机械搅拌式反应器, 并且还具有便于控制反应物浓度, 提高最终转化率和目标产物收率的优点, 因而被广泛应用于化工、发酵及废水处理等过程. 但是, 循环反应器在厌氧领域的发展较缓慢, 目前普遍采用的厌氧反应器为静态床反应器或者升流床反应器, 容积负荷小, 处理效能低下^[1,2]. 因此, 为了适应生化反应器向厌氧领域发展的需要, 本文在内循环反应器和外循环反应器的基础上^[3]提出了既有内循环系统又有外循环系统的厌氧反应器新思路, 并用实验方法对其流动和传热进行研究.

1 反应器的基本结构和工作原理

该双循环厌氧反应器为不锈钢材料, 结构如图 1 所示, 反应器外筒高 1 400 mm, 筒径 400 mm, 内筒高 1 000 mm, 筒径 260 mm, 竖直插管管径 22 mm, 插管底端距锥形封头顶端 30 mm, 筒体中部水平接管管径 22 mm, 管口距反应器轴心 20 mm. 其主要特点是依靠泵提供动力强制形成

外循环环流和内循环环流. 如图中箭头方向所示, 外循环系统从水平接管开始, 流经泵后回到筒顶的竖直插管; 内循环系统流经两条路线, 一条是从竖直插管底端向上流经内筒内侧回到中部水平接管处, 另一条则从内筒外侧向上流到水平接管处或流经内筒顶部, 从内筒内侧向下流回水平接管处. 料液的有序循环流动使反应器内部传质得到加强.

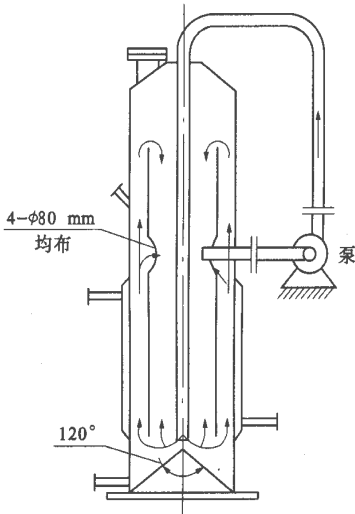


图 1 双循环厌氧反应器结构简图
Fig. 1 A schematic of the double-loop anaerobic reactor

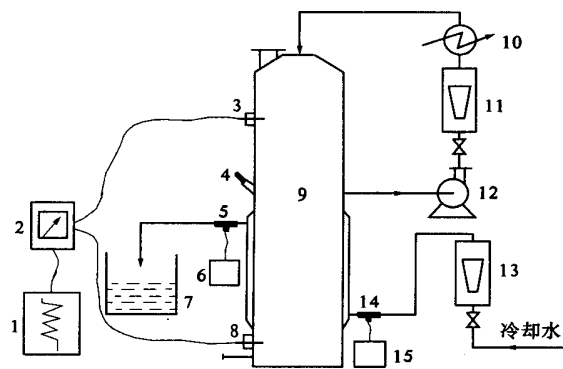
收稿日期:2003-03-15; 修订日期:2003-04-20
基金项目:河南省重点科技攻关项目(0323023000)

作者简介:马晓建(1953-),男,河南省遂平县人,郑州大学教授,主要从事化工设备及生化设备开发方面的研究.
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 实验部分

2.1 流动实验

液相循环速度是反应器的重要性能参数,它影响着反应体系的传质、传热以及混和过程.因此,本实验以水为工作介质研究了该双循环反应器的内循环流速与外循环流量间的关系,实验装置和流程如图 2 所示.实验过程采用脉冲示波法测算液体的内循环流速.在某—外循环流量下,当反应器内的流动稳定后,脉冲加入电解质示踪剂,用电导法记录其流动曲线,根据流动曲线计算出内循环流速.每个外循环流量下加入三次示踪剂,测出三个不同数据,求其平均值.然后改变外循环流量,重复以上操作,记录实验数据;在改变外循环流量时应更换筒内液体,以免液体中的离子浓度增加过大而影响实验效果.



1—记录仪;2—电导仪;3—电导电极;4—温度计;
5—热电偶;6—数显仪;7—水槽;8—电导电极;
9—双循环厌氧反应器;10—加热器;11—流量计;
12—循环泵;13—流量计;14—热电偶;15—数显仪

Fig. 2 Schematic diagram for the flow experiment and the heat transfer experiment

对实验数据进行回归,用 Excel 软件对比分析发现,当外循环流量在 $400 \sim 1450 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内时,使用指数模型能较好描述出内循环流速与外循环流量的关系,此时相关系数 R 最大,拟合曲线如图 3 所示,拟合方程为

$$u = 1.620 e^{0.011 V_{\text{out}}} \quad (1)$$

为了把图 3 中指数曲线线性化,对式 (1) 两边取科学对数得

$$\ln u = 0.0011 V_{\text{out}} + 0.4828 \quad (2)$$

线性回归结果如图 4 所示,相关系数 $R = 0.973$. 本实验测了 16 个不同外循环流量下的内循环液

速,即散点数 $n = 16$,则自由度 $f = n - 2 = 14$,若取检验水平 $\alpha = 0.01$,查实验次数和相关系数表^[9]可得此时的临界相关系数 $R_{0.01,14} = 0.623$,由于 $R = 0.973 > R_{0.01,14}$,所以 $\ln u$ 与 V_{out} 显著线性相关.

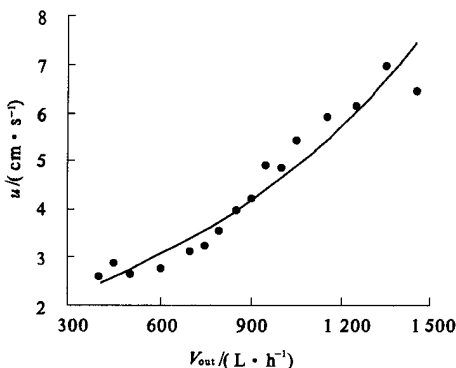


图 3 外循环流量对内循环流速的影响

Fig. 3 Effect of the outer loop flux on the inner loop velocity

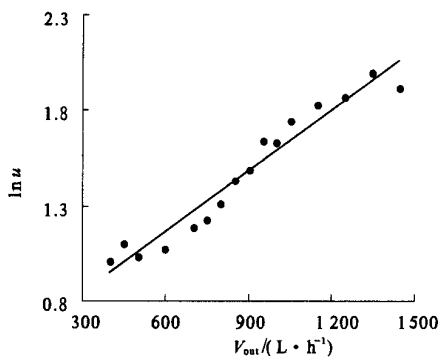


图 4 $\ln u$ 与 V_{out} 的线性关系

Fig. 4 Linearity between $\ln u$ and V_{out}

由图 3、4 可以看出,随着外循环流量的增大,内循环流速也增加,即反应器中料液的循环和混合传质效果就越好.所以我们可以通过调节外循环流量来控制内循环状况,从而获得最佳反应条件.

2.2 传热实验

细胞的生命活动同时伴随着能量的转换.通过生物氧化,培养基中能源释放出能量,用于维持细胞的生命活动并进行生物合成反应,其中未能用于生物反应的部分则以热的形式放出使培养基温度上升;使培养基温度上升的另一原因是液体受到机械扰动.循环反应器中的液体环流也产生机械扰动,机械扰动消耗的能量最终转化成热.同时反应器与周围环境也会发生热量交换.因此,要使反应器内维持一定的温度就要根据热量产生和损失的情况除去或补充热量,就要用到换热装

置^[5,9]. 由于筒体容积较小, 该双循环厌氧反应器采用夹套换热, 换热面积 0.6 m^2 .

实验装置和流程如图 2 所示, 同样以水为工作介质, 实验过程中保持反应器筒体内的水恒温 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, 夹套内通冷却水, 从而研究在不同外循环流量和冷却水流量下冷却水与筒内恒温水之间的传热系数. 由热量恒算可推算出如下公式

$$K=\frac{c_p \rho V_{\text{d}} \ln \left(\frac{T-t_1}{T-t_2}\right) \times 10^{-3}}{3\,600\,A} \quad (3)$$

式中: T, A 为已知量, c_p 和 ρ 可由水的物性表查得, 所以只需测出 t_1, t_2 和 V_C 便可由式 (3) 算出 K ; 测量 t_1, t_2 和 V_C 时同步记录外循环流量 V_{out} . 对求得的传热系数 K 与 V_C, V_{out} 进行回归分析, 当 V_{out} 在 $0\sim1300\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内, V_C 在 $250\sim750\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内时, 采用线性模型有较好的相关性, 线性回归结果如图 5 和图 6 所示. 由图 5、6 可看出, 当固定外循环流量时, 传热系数 K 随冷却水流量 V_C 增大而线性增大; 固定冷却水流量时, 传热系数 K 随外循环流量 V_{out} 增大也呈线性增大. 为此, 基于最小二乘法原理, 选用 Mathcad 软件进行二元线性回归, 得以下关联方程

$$K=179.013+0.081V_{\text{out}}+0.042V_C \quad (4)$$

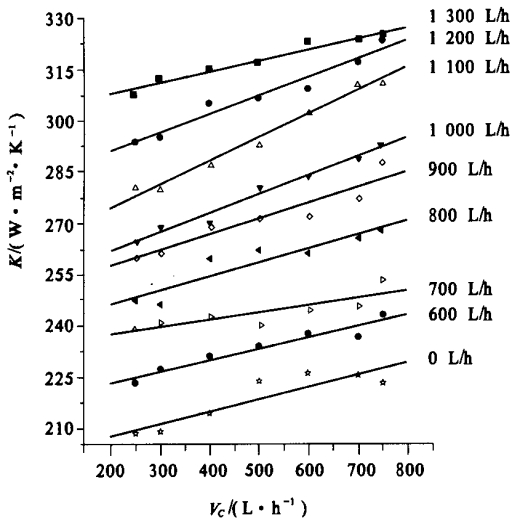


图 5 固定外循环流量时, 冷却水流量对传热系数的影响

Fig. 5 Effect of the cooling water flux on the thermal conductive coefficient when the outer loop flux is invariable

式 (4) 就是由实验得到的传热系数经验公式. 考察由经验公式所得计算值与实验值之间的差距, 从

而评估该经验公式是否与实际情况相符. 这里用到相对误差, 相对误差由 $\delta = \frac{|K_{\text{exp}} - K_{\text{cal}}|}{K_{\text{exp}}} \times 100\%$ 计算^[9], 根据本实验所得 63 组数据可算得 63 个 δ 值, 对所有的 δ 值进行分析, 发现 δ 在 $0\sim10.4\%$ 范围内波动, 如图 7 中实线所示; 而平均相对误差 δ_{avg} 为 3.8% , 如图 7 中虚线所示. 因为相对误差数值较小, 可以认为在实验允许误差范围之内, 这就证明外循环流量为 $0\sim1300\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, 冷却水流量为 $250\sim750\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 时传热系数经验公式能较好地反映实际情况.

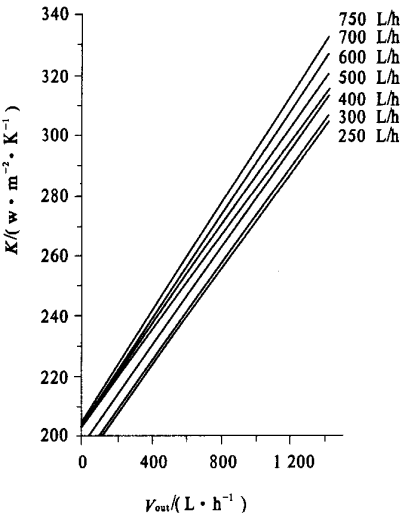


图 6 固定冷却水流量时, 外循环流量对传热系数的影响
Fig. 6 Effect of the outer loop flux on the thermal conductive coefficient when the cooling water flux is invariable

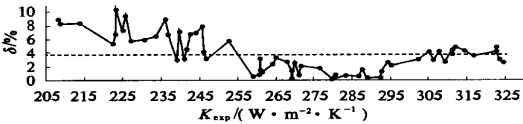


图 7 相对误差在所测传热系数范围内的波动
Fig. 7 Fluctuating of the relative error in the range of all measured thermal conductive coefficient

3 结论

双循环厌氧反应器性能稳定、良好, 易控制反应条件. 流动实验证明, 在流动稳定并且外循环流量为 $400\sim1\,450\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 内循环液速与外循环流量显著相关, 内循环液速随外循环流量增大呈指数增长, 此时可以通过调节外循环流量来调控内循环液速从而改变反应器的混合传质特性. 传

热实验则表明,外循环流量在 $0\sim1\,300\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内,冷却水流量在 $250\sim750\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内时,固定外循环流量,传热系数随冷却水流量增大线性增大.固定冷却水流量,传热系数随外循环流量的增大线性增大.实验还通过数学方法获得了传热系数经验公式,该经验公式能较准确地反映该反应器的传热特点.由于该双循环厌氧反应器的设计和试验都处于初步阶段,为了尽早投入工程应用,正对其进行进一步的改进和放大研究,以上流动实验和传热实验结果为此提供了参考.

符号说明:

- A —— 夹套的总传热面积, m^2 ;
 c_p —— 冷却水在 $\frac{t_1+t_2}{2}$ 下的比热容 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
 K —— 夹套内冷却水与筒内恒温水之间的传热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$;
 K_{exp} —— 传热系数实验值, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$;
 K_{cal} —— 式(4)得到的传热系数计算值, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$;
 t_1 —— 冷却水进口温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_2 —— 冷却水出口温度, $^{\circ}\text{C}$;

- T —— 恒温水温度, $^{\circ}\text{C}$;
 u —— 内循环液速, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$;
 V_{out} —— 外循环流量, $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$;
 V_c —— 冷却水流量, $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$;
 ρ —— 冷却水在 $\frac{t_1+t_2}{2}$ 下的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
 δ —— 相对误差;
 δ_{avg} —— 平均相对误差.

参考文献:

- [1] 梁世中. 生物工程设备 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002.
[2] 马晓建. 生化工程与设备 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.
[3] 方书起. 双循环气体搅动厌氧反应器 [P]. 中国专利, 02238698, 2003-02-28.
[4] 孙培勤, 刘大壮. 实验设计数据处理与计算机模拟 [M]. 郑州: 河南科技出版社, 2001.
[5] 戚以政, 汪叔雄. 生化反应动力学与反应器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
[6] 尚海涛. 智能控制在黄原胶发酵温度及 pH 值控制中的应用 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(1): 55~58.

Study on Flow and Heat Transfer of Double-loop Anaerobic Reactor

MA Xiao-jian¹, LIU Long-fei¹, SUN Feng-jie¹, WANG Gen-can²

(1. College of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Xuchang Industry Device Fixing Parent Company, Xuchang 461500, China)

Abstract: Bioreactor is the most important equipment to bioprocess. In view of the specialty of the anaerobic reaction the anaerobic reactor with both inter-loop and outer-loop is put forward as a new train of thoughts. This paper layes its stress on the structure, the flow experiment and the heat transfer experiment of the reactor. The result of the experiments indicates that after the flow is steady the inter-loop velocity increases exponentially as the outer-loop flux increasing if only the outer-loop flux ranges from $400\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ to $1\,450\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ and that the thermal conductive coefficient increases linearly as the outer-loop flux increasing or the cooling water flux increasing if only the outer-loop flux ranges from $0\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ to $1\,300\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ and the cooling water flux ranges from $250\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ to $750\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$.

Key words: inter-loop; outer-loop; anaerobic reactor; flow; heat transfer