

低高径比喷射环流生化反应器 流体力学和发酵性能的研究

吴 鹏 甘一如 胡宗定

(天津大学化学工程系 天津 300072)

摘 要 对高径比 $s \leq 2.5$ 喷射环流生化反应器的流体力学和传质特性进行了系统的研究, 选出反应器的最佳结构, 关联出氧的体积传递系数 ($k_L a$) 表达式。在此基础上, 进行了谷氨酸发酵试验, 摸索出用该设备进行谷氨酸发酵的最佳工艺条件, 使 5 批一次性投糖发酵的糖酸转化率达到 50% 以上。

关键词 喷射环流反应器, 氧的体积传递系数, 谷氨酸

由于喷射环流生化反应器的结构简单, 能量消耗低, 传质性能好, 易于放大等优点, 受到国内外生物工程学家的普遍重视。前人⁽¹⁻³⁾对高径比 $s \geq 7$ 环流生化反应器流体力学和

传质特性, 已经做了大量的研究工作, 并将其用于微生物发酵的热模实验, 但是对 $s \leq 2.5$ 反应器的研究却尚未见报道。鉴于对我国现有发酵罐技术改造, 设备挖潜的思想, 本文对高径比 $s \leq 2.5$ 喷射环流生化反应器的气含率, 液体循环速度, 氧的体积传递系数等流体力学及传质特性进行研究, 确定该反应器的最佳结构。

谷氨酸发酵是一种较为复杂的工艺过程, 具有一定的代表性和典型性⁽⁴⁾。因此, 通过考查低高径比喷射环流反应器的谷氨酸发酵性能, 将能很好地表明该反应器生物性能的优劣, 以及在味精行业乃至整个发酵行业中推广应用的价值。

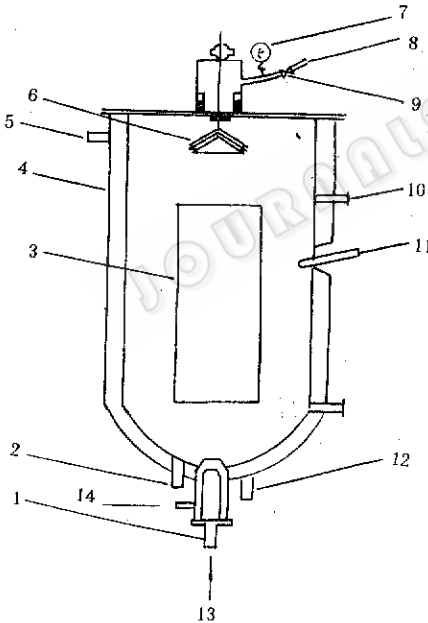


图 1 JLR 结构图

1. Gas-liquid nozzle, 2. Material outlet, 3. Draft tube, 4. Jacket, 5. Cooling water outlet, 6. Foam breaker, 7. Pressuremeter, 8. Air outlet, 9. Valve, 10. Opening for gas hold up measuring, 11. Insertion of thermometer, 12. Cooling water inlet, 13. Air inlet, 14. Material inlet

1 材料与方 法

1.1 设备结构

喷射环流生化反应器的结构如图 1 所示。反应器由不锈钢制成, 同心环形喷嘴口径为 10mm, 由黄铜制成, 导流筒直径与反应器

的直径比 D_E/D 分别取 0.31, 0.48, 0.65, 0.71, 0.82 等几种, 其他有关结构参数的选取参照 Blenke^[1] 经验关联式。

1.2 测试方法

1.2.1 气含率(ϵ)的测定: 采用吹气式 U 型管压差计测定气含率, 测试原理参见图 2。该方法的优点是用无菌空气将待测物系和压差计的密封液分离开, 特别适用于微生物发酵物系。气含率 ϵ 可以通过测量通气前后压差计液位差的变化求得:

$$\epsilon(\%) = \frac{\Delta H_{前} - \Delta H_{后}}{\Delta H_{后}} \quad (1)$$

1.2.2 循环速度(w_m)的测定: 采用双探头电导电极法测定循环速度。将电极探头置于导流筒内和环隙中, 当 KCl 示踪剂随被测液体做循环运动时, 分别测得液体在导流筒内上升和环隙中下降所需的时间 t_1 和 t_2 , 则平均循环速度为:

$$w_m = \frac{2H}{t_1 + t_2} \quad (2)$$

1.2.3 氧的体积传递系数(k_{La})的测定: 采用 0.01mol/L CuSO_4 催化 Na_2SO_3 氧化法^[4] 测定氧的体积传递系数。

1.3 谷氨酸发酵原料

1.3.1 菌种: 棒状杆菌 T_{6-13} (*Corynebacterium glutamicum*), 天津味精厂提供。

1.3.2 发酵培养基组成(%): 水解糖 11.0—14.0, 玉米浆 0.55—0.60, $\text{KH}_2\text{PO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0.15, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.075, Fe^{2+} 2mg/L, Mn^{2+} 2mg/L。

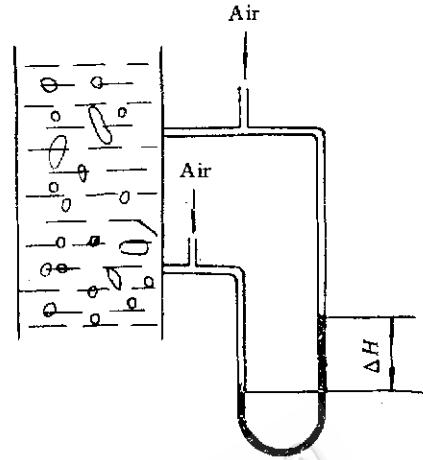


图 2 气含率 ϵ 的测试原理

Fig. 2 Principle of gas hold up ϵ measuring

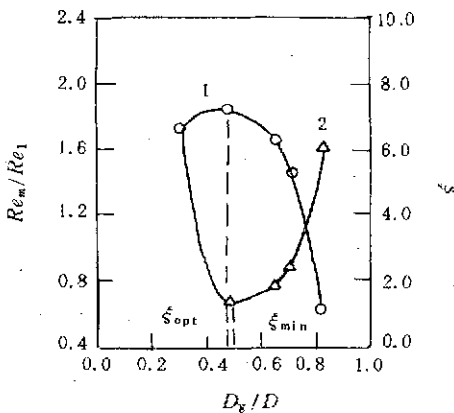


图 3 D_E/D 、 Re_m/Re_1 和 ξ 的关系

Fig. 3 Relation of D_E/D 、 Re_m/Re_1 and ξ

A. Re_m/Re_1 , B. ξ

2 结果与讨论

2.1 导流筒尺寸的优化

图 3 给出了不同直径比 D_E/D 、雷诺数比 Re_m/Re_1 及阻力系数 ξ 之间的关系。从实验结果中发现, 系统最小阻力系数 ξ_{min} 时的 D_E/D , 与最佳结构阻力系数 ξ_{opt} 时的并不相同 [$(D_E/D)_{opt} = 0.48$, $(D_E/D)_{min} = 0.501$]。系统阻力最小, 说明反应器的能量消耗最小; 而反应器结构最佳, 是指流体的混合效果最优, 使质量得到最充分的传递, 因此两者之间存在着差异。

2.2 反应器结构最佳时的流体特性

2.2.1 气含率(ϵ): 图 4 给出了全塔平均气

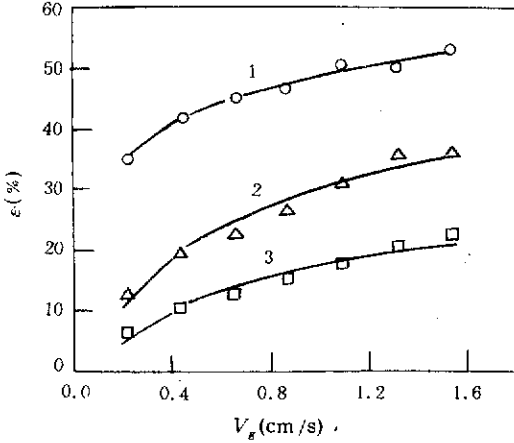


图 4 $\bar{\epsilon}$ 随 V_g 的变化

Fig. 4 Dependence of $\bar{\epsilon}$ on V_g

Re_1 : 1. 1.21×10^5 , 2. 9.66×10^4 , 3. 2.08×10^4

含率 $\bar{\epsilon}$ 随气速 V_g 的变化曲线。研究表明, $\bar{\epsilon}$ 随 V_g 的增大而增加, 并逐渐达到饱和, 饱和点的位置随液速 V_1 变化。同样, 液速 V_1 的增大也有利于 $\bar{\epsilon}$ 的增加, 但在不同操作范围内, 差别很大。

2.2.2 循环比 (n_L) 和平均循环雷诺数 (Re_m): 循环比是喷射环流生化反应器循环强度的一个重要指标, 用液体循环量与喷嘴射入量之比表示, 即

$$n_L = \frac{V_{\text{循环}}}{V_1} \quad (3)$$

图 5 给出了不同操作条件下的循环比 n_L 。从图中看出, n_L 随 Re_1 的增加而降低, 随 V_g 的变化规律, 与 $\bar{\epsilon}$ 随 V_g 的变化关系一致。存在着最佳气速。在实验范围内, 可以近似认为反应器达到了全混状态。

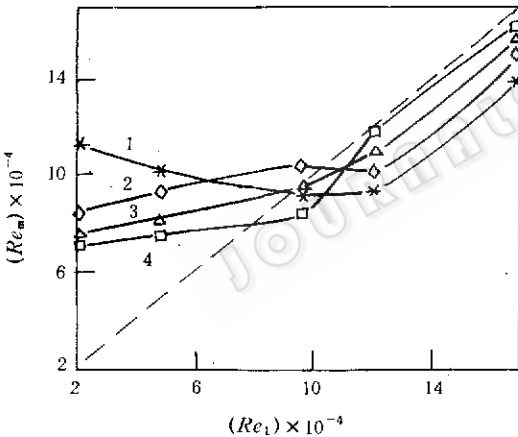


图 5 n_L 随 V_g 的变化

Fig. 5 Dependence of n_L on V_g

1. 2.08×10^4 , 2. 4.83×10^4 ,
3. 9.66×10^4 , 4. 1.21×10^5

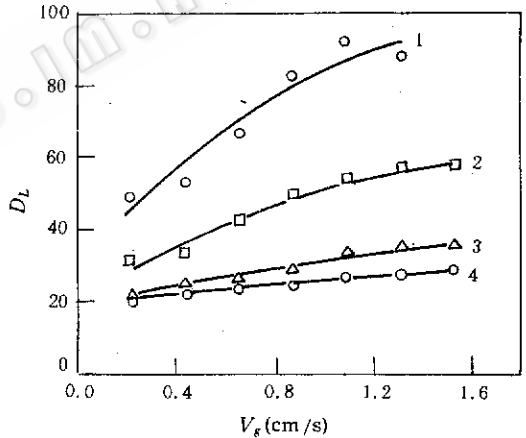


图 6 Re_m 随 Re_1 的变化

Fig. 6 Dependence of Re_m on Re_1

V_g (m³/h): 1. 0.785, 2. 0.657, 3. 0.438, 4. 0.219

操作条件对系统混合性能的影响存在两个明显的区域, 如图 6 所示。当喷嘴雷诺数 $Re_1 < 9.5 \times 10^4$ 时, Re_m 随气速 V_g 的增加而增大, 说明在该操作范围内, 液体的循环流动主要来自气提力; 当 $Re_1 \geq 9.5 \times 10^4$ 时, Re_m 与 Re_1 成正比增加, 此时液体的循环流动主要依靠喷射力。

2.2.3 氧的体积传递系数 ($k_{L,a}$): 图 7、8 分别给出 $k_{L,a}$ 与 V_g 和 V_1 的变化关系, 结果表明 $k_{L,a}$ 随 V_1 的增大而迅速增加, 随 V_g 的增大则趋于平缓。采用最小二乘法对各操作参数进行回归, 得到以下关联式

$$Re_1 < 7.44 \times 10^4 \quad k_{La} = 3.502 \times 10^{-5} V_g^{0.75} Re_1^{1.37} \quad (4)$$

平均相对偏差小于 5.6%。

$$Re_1 \geq 7.44 \times 10^4 \quad k_{La} = 3.02 \times 10^{-13} V_g^{0.75} Re_1^{3.67} \quad (5)$$

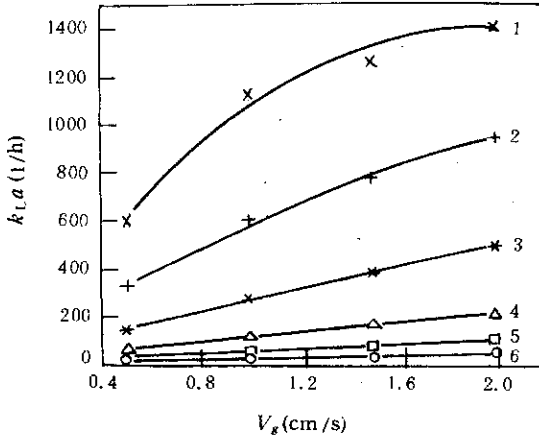


图 7 k_{La} 随 V_g 的变化

Fig. 7 Dependence of k_{La} on V_g

Re_1 : 1. 1.21×10^5 , 2. 9.66×10^4 , 3. 7.44×10^4 ,
4. 5.58×10^4 , 5. 3.72×10^4 , 6. 1.86×10^4

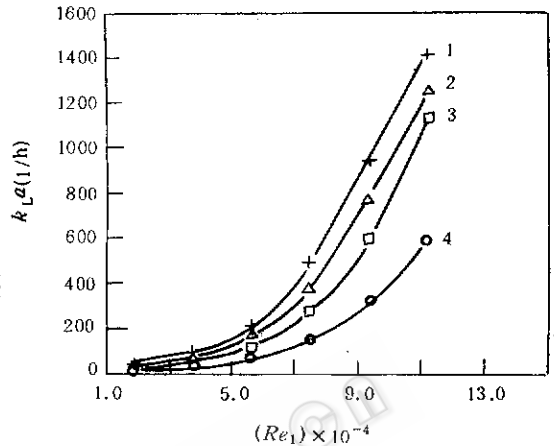


图 8 k_{La} 随 Re_1 的变化

Fig. 8 Dependence of k_{La} on Re_1

V_g (m^3/h): 1. 2.0, 2. 1.5, 3. 1.10, 4. 0.5

平均相对偏差小于 8.3%。以上回归结果也反映出喷射力和气提力在不同区域所起的作用是不同的。

在实验范围内,氧传递效率为 3.4—6.5 kg/kW·h。

通过研究发现, $s \leq 2.5$ 喷射环流生化反应器是一种高效、节能、气泡分布良好的新型生化反应器,适用于微生物发酵。

2.3 谷氨酸发酵试验

将配好的发酵液定容 40 升,用 4 mol/L NaOH 调节 pH 至 6.7—7.0 之间,加泡敌 10 ml,尿素 0.5%,倒入发酵罐,通 120℃ 蒸汽进行实消。冷却降温,按 2.0% 种量接种。放罐容积为 44 升。

2.3.1 发酵过程控制: 谷氨酸发酵以代谢调控理论为基础,在菌种、配料、温度和 pH 值控制适宜的情况下,氧的供给对发酵起到决定性的影响。因此,供氧存在着最佳值。由于在发酵的不同阶段,菌种的活性不同,需氧量亦不相同,这就要求对各阶段的最佳供氧量做不同的调整。通过发酵试验,摸索出适宜谷氨酸发酵的控制条件,如表 1 所示(表中菌体浓度 OD_{620nm} 值为发酵液稀释 5 倍时的光密度)。

2.3.2 试验结果: 表 2 列出了 5 罐稳定发酵的试验结果和性能指标。图 9 给出了第 9 罐的供氧水平以及发酵物系性能指标在不同发酵阶段的变化。图中曲线 A 为反应器的供氧水平,用与发酵控制条件相对应的 Na_2SO_3 物系氧的体积传质系数 $k_{La}(Na_2SO_3)$ 表示;曲线 B 为菌体的耗氧速率,用 r_{ob} 表示;曲线 C 为菌体呼出 CO_2 量与摄入 O_2 量的比值,是菌体活性和耗氧水平的综合性参数,用 $R.Q.$ 表示;曲线 D 为糖酸的瞬时转化率,用 $\Delta P/\Delta S$ 表示。

表1 发酵过程控制

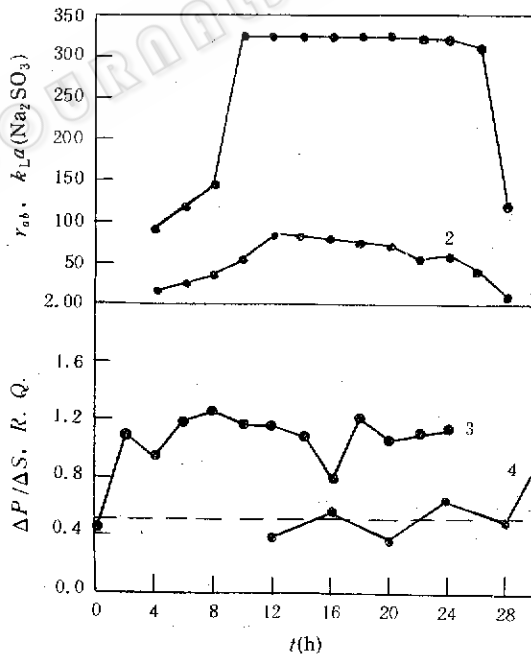
Table 1 Fermentation process controlling

Time	Formtation period	Middle period	Latter period
Temp. (°C)	33—34	35—36	37—38
O D value*	O D < 0.49		O D ≈ 0.49
pH value	6.7—7.0	7.0—7.2	> 6.7
Liquid velocity V_1 (m ³ /h)	1.0—1.5	2.0	1.5—1.8
Gas velocity V_g (m ³ /h)	0.5—0.75	0.9—1.2	0.75—0.9

表2 谷氨酸发酵试验结果

Table 2 The result of glutamic acid fermentation of five batches in JLR

Batch	Initial sugar conc. (%)	Remainder sugar conc. (%)	Fermentation time (h)	Glu conc. (%)	Conversion (%)	Power consumption (kW/m ³)	Oxygen transfer efficiency (kg/kW·h)
6	13.3	0.2	38	6.15	51.7	0.491	7.71
7	13.2	1.2	44	6.02	55.6	0.491	3.69
8	13.5	0.1	36	6.21	51.0	0.602	4.17
9	13.2	0.1	30	6.47	54.4	0.498	5.07
10	14.0	0.2	38	6.58	52.5	0.491	4.69

图9 发酵过程 $k_{La}(\text{Na}_2\text{SO}_3)$, r_{ab} , $R.Q.$ 及 $\Delta P/\Delta S$ Fig. 9 Dependence of $k_{La}(\text{Na}_2\text{SO}_3)$, r_{ab} , $R.Q.$ and $\Delta P/\Delta S$ on fermentation time1. k_{La} , 2. r_{ab} , 3. $R.Q.$, 4. $\Delta P/\Delta S$

谷氨酸发酵供氧的最佳控制范围

前期 $k_{La}(\text{Na}_2\text{SO}_3) = 75-200\text{L/h}$ $r_{ab} = 25-50\text{mmol/L}\cdot\text{h}$ 产酸期 $k_{La}(\text{Na}_2\text{SO}_3) = 200-320\text{L/h}$ $r_{ab} = 50-90\text{mmol/L}\cdot\text{h}$

由于目前我国发酵行业中所使用的发酵罐,大多是低高径比的机械搅拌罐,因此,对低高径比喷射环流生化反应器的开发和研制,以及对微生物发酵性能的考查,为我国发酵行业的设备挖潜和技术改造提供了依据,具有重要的理论和应用价值。

符号说明

D, D_1, D_E	反应器直径、喷嘴直径、导流筒直径(m)	s	反应器高度与直径比
k_{La}	体积氧传递系数(1/h)	V_1, V_g	液体流量、气体流量(m^3/h)
n_L	循环比	w_m	循环速度(m/s)
r_{ab}	耗氧速率(mmol/h)	ϵ	气含率(%)
Re_1, Re_m	喷嘴雷诺数、平均雷诺数	ξ	阻力系数

参 考 文 献

- [1] Blenke H. *Adv Biochem Eng*, 1979, 13:121.
 [2] 姜信真等. *生物工程学报*, 1987, 3(2):153.
 [3] 张文会, 高孔荣. *生物工程学报*, 1993, 9(2):170.
 [4] 天津轻工业学院等. *氨基酸工艺学*, 北京:轻工业出版社, 1986, p. 236.

Studies About Hydrodynamics and Characteristics of Fermentation of the Jet Loop Bioreactor with Low Height-diameter Ratio

Wu Peng Gan Yiru Hu Zongding

(Department of Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract The hydrodynamics and mass transfer characteristics of jet loop bioreactor with low height-diameter ratio $s \leq 2.5$ were studied in detail. The most suitable structure and volume oxygen transfer coefficient were obtained. According to above results, the experiments of glutamic acid fermentation were carried out, and the sugar-acid conversion in five batch fermentations were reached above 50%.

Key words Jet loop reactor, volumetric oxygen transfer coefficient, glutamic acid