

固定化酵母流化床生物反应器的设计方法

曹玉瑞^① 鲁楠

(沈阳农业大学)

提 要 介绍了制取酒精用的固定化酵母流化床生物反应器的设计方法,阐述了流化床生物反应器的设计程序与计算公式、主要部件图和工艺流程。年产 30 t 酒精的反应器系统试运转证明,反应器的设计计算正确、工艺合理。

关键词 酵母流化床 生物反应器设计 结构设计 工艺流程

The Design Procedure and Calculation Methods of Fixed-Yeast Fluidized-Bed Biological Reactor

Cao Yurui Lu Nan

(Shenyang Agricultural University)

Abstract This paper introduced the design and calculation methods of fixed-yeast fluidized-bed biological reactor used for refining alcohol. The calculation formulas, main parts and technological process of the fluidized-bed biological reactor were presented. Test showed that the reactor for an alcohol annual output of 30 tons was correct in calculation and reasonable in technology.

Key words Fixed yeast Biological reactor Process structure design

1 引 言

用固定化酵母流化床生物反应器发酵酒精不但具有速度快、产率高、易于实现自动化生产等优点,而且具有设备投资少、厂房占地面积小等特点。固定化发酵技术中的核心设备是流化床生物反应器。笔者根据几年的实验数据及有关文献,设计过 6 个规格的生物反应器,归纳出反应器设计程序与计算公式。

设计具有一定生产能力的流化床生物反应器的根据是酒精发酵理论及运行实验参数。蔗糖发酵生成无水酒精的理论转化率为 54%;同时生成 CO₂ 的理论转化率为 51%,用 14% 的蔗糖液发酵实验的结果表明,发酵 4 h,酒精含量为 8.8%(容量),总产率达 18 g/L·h,酒精的转化率是 49.6%,达理论转化率的 91%以上。

2 流化床生物反应器的设计程序与计算公式

2.1 确定已知条件

投稿日期:1995-03-19 1996-01-03 修订

①曹玉瑞,副教授,沈阳市东陵路 120 号 沈阳农业大学农业工程学院,110161

设计流化床生物反应器的已知条件包括工厂拟达到的生产能力、中试数据及酒精生产理论。

2.1.1 工厂拟达到的生产能力

用 K 表示工厂全年拟生产酒精数量, t/年; T 表示工厂全年计划生产天数, d。

2.1.2 中试数据

与设计反应器有关的实验数据是, B_1 发酵液含糖浓度(%); T_1 发酵液在反应器内停留时间或称滞留期, h; S 粒子填充系数, 即固定化酵母粒子占反应器容积的比例(%); Y 酒精发酵率(%); Z 酒精蒸得率, 即从蒸馏塔蒸馏出的酒精量占醪液中酒精含量的百分数(%), 其值在 92.5%~97%。

2.1.3 酒精发酵理论值

用 L 表示蔗糖发酵酒精时的理论转化率(%); J 表示发酵反应时生成 CO_2 的理论转化率(%).

2.2 生物反应器的设计程序与计算

2.2.1 生物反应器的外形结构

透过对用有机玻璃制成的三段锤式反应器内物料运动规律的观察, 其内部的固体粒子、发酵液、 CO_2 气体三相流动层均按统计规律运动着, 如图 1 所示。 CO_2 从气室进入反应器第一单元形成反应动力, 使粒子、液体受到垂直向上的力。发酵液在高位压力作用下由第一单元底部的两个切向安置着的管口进入, 推动着粒子并一同螺旋上升。粒子在发酵反应时生成的 CO_2 附着其表面, 形成浮力使粒子上升, 即在反应器内层, 发酵液和粒子呈螺旋上升运动, CO_2 气体垂直上升运动。当粒子上升至第二、三单元后发酵反应减弱, 附着在表面上的 CO_2 在反应动力作用下释放, 浮力减小, 粒子沿着器壁返回至第一单元的底部, 再次同发酵液充分接触反应, 始终维持着最旺盛的发酵反应。故而反应器每一单元设计成如图 2 所示结构。图 3 是反应器结构示意图。

2.2.2 纺锤形反应器单元几何尺寸

根据工厂拟达到的生产能力及工艺参数, 在选定所需反应器台数为 N (N 台反应器并联发酵) 之后, 可计算出每台反应器的容积大小 V_1 (m^3), 其计算公式:

$$V_1 = \frac{KT_1}{24(1-S)TZLN} \left(\frac{1}{B_1 Y} + J \right) \quad (1)$$

反应器是由三个体积相同的三个纺锤形发酵单元组成, 故计算每个单元容积的公式为:

$$V_0 = \frac{V_1}{3} = \frac{KT_1}{72(1-S)TZLN} \left(\frac{1}{B_1 Y} + J \right) \quad (2)$$

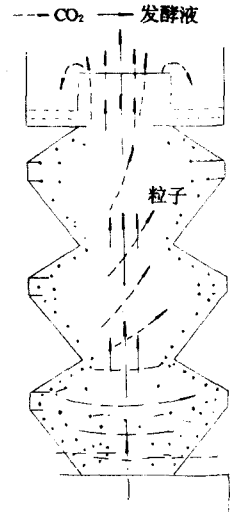
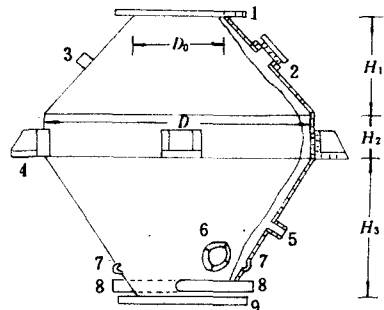


图 1 反应器内固液气三相流动层反应动力



1,9 法兰 2,6 视镜 3 测温管接头 4 托板
5 取样管接头 7,8 进料管接头

图 2 纺锤形反应器单元结构

通过实验测出，每一发酵单元各部分几何尺寸的最佳比例关系是：

$$D/D_0 = 3.055, D/H_1 = 2.619, D/H_2 = 5.5, D/H_3 = 1.774$$

由此得出各部分几何尺寸的计算公式是

$$D = \left[\frac{KT_1}{35.856TZL(1-S)N} \left(\frac{1}{B_2Y} + J \right) \right]^{1/3} \quad (3)$$

$$D_0 = \frac{D}{3.055}, H_1 = \frac{D}{2.619}, H_2 = \frac{D}{5.5}, H_3 = \frac{D}{1.774}$$

2.2.3 反应器气室结构及几何尺寸

结构如图4所示。设 $D_i = D, H_4 = I_1 D_i, H_5 = I_2 D_i, H_6 = I_3 D_i, H_7 = I_4 D_i$ 。式中的 $I_1 = 0.04 \sim 0.1, I_2 = I_4 = 0.1, I_3 = 0.5$ 。

2.2.4 贮醪室结构与几何尺寸

贮醪室结构如图5所示。发酵醪液从反应器第三单元的上口经贮醪室内管5溢出进入贮醪室。为使成熟醪能克服贮醪室内的负压状态从出醪管6连续流出，则要求内管5有一定的高度。其计算公式是：

$$L_R = L_a + L_b = L_a + 1.02 \times 10^{-4} P_L \quad (4)$$

式中 $L_a = 0.3 \sim 0.5$ m, P_L 是贮醪室内负压指示值, Pa。选 $D_R = D_0, D_L = D, K_1 = L_R, K_2 = I_3 D_L, K_3 = I_4 D_L, K_4 = I_1 D_L$ 。

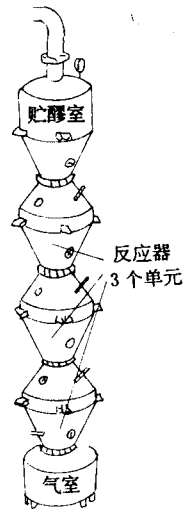


图3 反应器外形结构

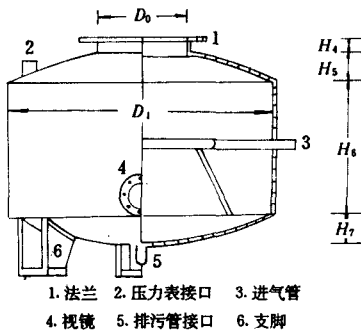


图4 气室结构示意图

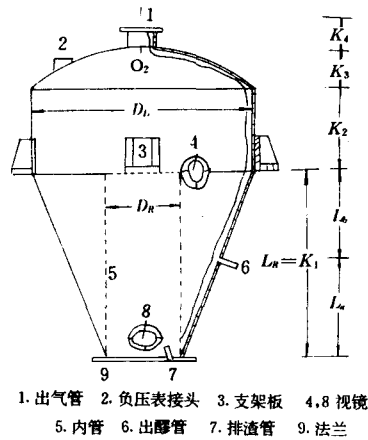


图5 贮醪室结构示意图

3 应用举例

试设计计算年产30 t酒精的固定化酵母流化床生物反应器，已知条件： $K=30$ t, $T=300$ d, $B_2=14\%$, $T_1=4$ h, $S=35\%$, $Y=85\%$, $Z=94\%$, $L=54\%$, $J=51\%$, $N=1$ 。

由(1)式计算得：单个反应器发酵容积为 0.45 m^3 ；纺锤形单元的容积 $V_0 = \frac{V_1}{3} = 0.15 \text{ m}^3$ 。

各段几何尺寸： $D=0.67$ m, $D_0=0.219$ m, $H_1=0.225$ m, $H_2=0.12$ m, $H_3=0.337$ m。

气室几何尺寸为： $D_i=D=0.67$ m, $H_4=0.053$ m, $H_5=0.067$ m, $H_6=0.335$ m, $H_7=0.067$ m。

贮醪室几何尺寸的计算:设备正常运转时贮醪室内压强 $P_L=5316\text{ Pa}$ 。

选 $L_a=0.3\text{ m}$, 计算出的 $L_R=0.3+\frac{13.6\times 40}{1000}=0.84\text{ m}$, $D_R=0.219\text{ m}$, $D_L=0.67\text{ m}$, $K_1=0.84\text{ m}$, $K_2=0.335\text{ m}$, $K_3=0.067\text{ m}$, $K_4=0.053\text{ m}$ 。

4 设计实践

笔者于1987年10月试制了年产30t酒精的固定化酵母流化床生物反应器及配套设备,组成的生产酒精工艺流程如图6所示。在甜高粱收获季节以甜高粱茎秆汁液进行发酵实

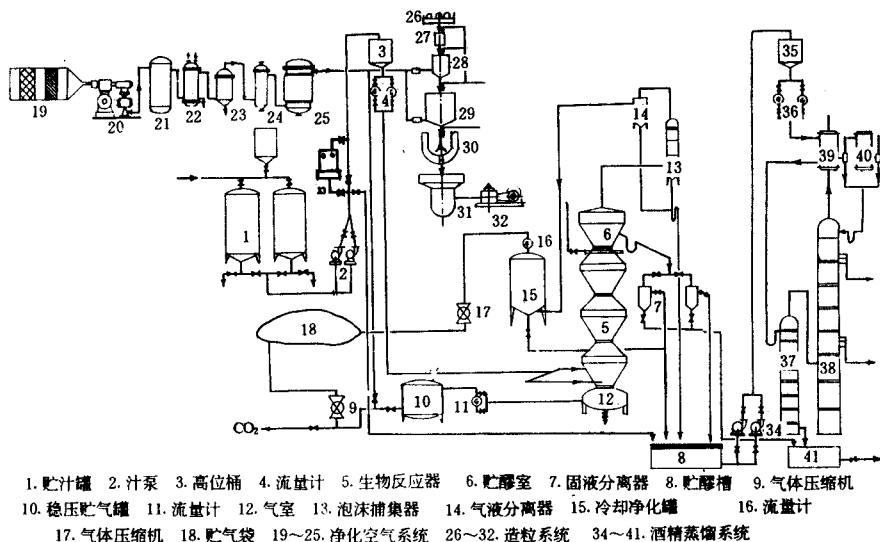


图6 450L固定化酵母流化床生物反应器生产酒精工艺流程图

表1 发酵过程中主要参数值(1994.9.6)

主要数据	测试时间					
	14:20	15:20	16:20	17:20	18:20	19:20
菌种数/ml 粒液	1.7×10^7	2.23×10^7	2×10^7		2×10^7	
温度/℃	30	29	31	32.5	32.5	32.5
pH值	4	4	4	4	4	4
残糖(%)	0	0	0	0	0	0
酒精度(%)	7	7	7	7	7	7
酒精转换率(%)	50	50	50	50	50	50
转换率达理论值(%)	93	93	93	93	93	93
酒精产率/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7

验,收到了满意效果。1994年,笔者结合“中国东北寒冷地区能源自给示范基地”建设设计了采用三种原料生产酒精的固定化酵母流化床生物反应器发酵系统及工艺,反应器总容积 2.8 m^3 ,日产酒精 400 kg 。发酵过程中的主要数据如表1。经一个月试运转测试表明,各小时的酒精度数基本稳定在7%(容量),醪液的残糖量为0,经计算,酒精的转化率为50%,达理论

转化率的93%,酒精产率为 $17.7 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。

5 结束语

本反应器结构克服了固定化酵母粒子上浮集中于液体表面现象,粒子表面的 CO_2 释放后可上下流化,与糖蜜充分接触进行发酵反应,故效率高,其结构优于柱状反应器。

该流化床生物反应器可快速发酵其他物料,开发新产品;同时也可实施微机操作,提高工艺自动化的程度。

参 考 文 献

- 1 华南工学院,无锡轻工学院等编著.酒精与白酒工艺学.北京:轻工业出版社,1980. 269~271
- 2 无锡轻工学院,河北轻工学院合编.酒精工艺学.北京:中国财政经济出版社,1962. 477~502,552~553
- 3 段俊英,曹玉瑞等.用固定化增殖细胞由甜高粱汁液制取燃料酒精.生物工程学报,1987,3(3):233~234
- 4 Lu Nan, Gustavo Best, Carlos Coelho de Carvalho Neto. Integrate energy systems in China. Rome,FAO of the united nations1994,86~110
- 5 曹玉瑞等.固定化酵母流化床生物反应器生产酒精工业性系统的设计.沈阳农业大学学报,1995,26(3):293~298