

# 第 6 章 生物反应器

桑庆亮

泉州师范学院

2018 年 6 月 1 日

### 一、生物反应器的设计目标

生物反应器是用于完成生物化学反应的核心装置，它处于生物反应过程的中心地位。

生物反应器的选择与设计是生化工程的中心问题。

设计目标：提供最佳环境，得到更多产物，克服限制因素 → 达到优质、高产、低成本

### 二、生物反应器的特点

1、由酶催化 → 复杂性特点

2、培养过程中环境条件改变 → 调节 → 传质问题（传质阻力）

培养过程中产热 → 避免温度过高 → 传热问题

因此，要控制反应过程使之处于最优化状态，最重要的是解决**传质**和**传热**的问题。

3、有利于维持最佳条件

4、避免污染

5、反应在水相进行

### 三、生化反应器的设计原则

反应器在工程上的设计原则是基于强化传质、传热等操作，将催化剂的活性控制在最佳条件，并在保证产品质量的前提下降低成本。

反应器设计离不开生物反应动力学，基本原则是基于反应系统中的质量守恒，计算好物料衡算式、热平衡式、反应动力学公式与流体流动特性有关的公式等。

无论反应器的操作方式如何，各种衡算式是反应器设计的基本依据。

## 6.2 生物反应器的分类

1. 根据生物催化剂种类分：酶反应器和细胞反应器。

酶反应器：游离酶、固定酶

细胞反应器：微生物细胞反应器、植物细胞反应器和动物细胞反应器

2. 根据操作方式分：间歇式反应器、连续式反应器和半连续/流加式反应器

间歇式反应器：一次投料，非稳态系统

连续式反应器：投料后达到稳态，补料/出料，反应物体积恒定

半连续式反应器：投料后补加，反应物体积逐渐增大，拟稳态

3. 根据反应器内流体流动及物粒混合程度分：理想反应器和非理想反应器.

理想反应器：全混流式反应器（CSTR）和活塞流式反应器（PER）

CSTR：间歇式和连续式

非理想反应器需要考虑流动和混合的非理想程度.

## 6.2 生物反应器的分类

4. 根据反应器的结构特征分：罐式、管式、塔式、膜式等.

罐式：高径比一般  $1 \sim 3$ ，最常见.

管式：长径比 30 以上，只能用于连续培养方式.

塔式：介于罐式和管式之间，只能用于连续培养方式.

膜式：在罐式、管式或塔式中加装膜件，防止细胞/酶流出

## 5. 根据相态分类：均相反应器和非均相反应器

均相：反应在一个相内完成，通常是水相。比较简单，传质问题小，基质、产物一般溶于水。

非均相：反应在两个以上相内完成，如固定化酶



## 6.3 好氧微生物细胞反应器

目前常用的好氧生物反应器有机械搅拌通风式、机械搅拌自吸式、气升环流式、彭泡式等。其中机械搅拌通风式应用最广泛。

### 一、机械搅拌通风式反应器

1. 结构：罐体、搅拌器 + 挡板、空气分布器/通风管、消泡装置、轴封
2. 特点/优点：(1) 搅拌桨剪切力作用下，强化了湍流，同时破碎气泡，有利于传质/氧；(2) 剪切力减小丝状微生物大小，有利于传质/氧；(3) 工业规模的放大方法已规范化；(4) 适合于连续培养
3. 缺点：(1) 搅拌功耗大；(2) 内部结构复杂，不易洗净，易感染杂菌；(3) 过高的剪切力对细胞生长有害。

### 二、机械搅拌自吸式反应器

无需空气压缩机提供压缩空气，而领先机械搅拌吸气装置吸入无菌空气，并同时实现混合搅拌与溶氧传质的反应器。

主要用于酵母、单细胞蛋白生产、醋酸发酵、生化曝气等方面。

#### 1. 吸气原理：

关键部件是带有中央吸气口的搅拌器，简称转子。这种搅拌器的作和相当于离心泵的叶轮，内部空心，四周有叶片，叶轮高速旋转，液体被甩向四周，在叶轮中心形成负压，空气被吸入，气液通过导向叶轮均匀分布百被甩出，并在发酵液中形成小泡，在湍流状态下混合、湍动和扩散。

## 6.3 好氧生物细胞反应器

2. 特点/优点：(1) 不必配备空压机，节约设备投资；(2) 气液接触良好，气泡分散较细，溶氧系数高，能耗较低

缺点：(1) 吸收空气增加了染菌机会；(2) 必须配备低阻力损失的高效空气过滤系统.

3. 机械搅拌自吸式反应器的设计要点：(1) 罐体高径比不宜取大；(2) 转子选择直径较大、剪切力较小的；(3) 吸气量需准确计算

### 三、气升环流式反应器

工作原理：把无菌空气通过喷嘴或喷孔喷射进环流管，通过气液混合物的湍流作用而使空气泡分割破碎，同时由于上升管内形成的气液混合物密度降低故向上运动，而含气率低的发酵液下沉，形成循环流动，实现混合与溶氧传质。

应用：酵母生物、细胞培养、酶制剂生产、有机酸发酵等。

根据发酵液的流动形式，可分为内循环式和外循环式。

罐内反应液在环流管内循环一次所需的时间称为循环周期；反应液的环流量与通风量之比称为气液比；反应液在环流管内的流速称为环流速度。

循环周期、气液比、环流速度等参数是调节控制的指标。

优点：(1) 反应溶液分布均匀；(2) 有较高的传质速率和溶氧效率；(3) 剪切力小，对生物细胞损伤小；(4) 传热良好；(5) 结构简单，易于加工制造。

## 6.3 好氧生物细胞反应器

### 四、鼓泡塔反应器

由反应器底物通入气体，利用气体上升过程中所产生的大量气泡带动液体而达到混合作用，同时供氧。

通常以气体为分散相，液体为连续相，液相中包含悬浮颗粒，如细胞、固体基质等。

优点：结构简单、操作成本低、混合和传质传热性能较好、温度易控制、固体颗粒易处理、没有磨损和堵塞、无传动部位，易密封，不易染杂菌。

缺点：要求压缩空气有较高的压力、培养液粘度过度、需氧量高者不适宜。

应用：乙醇发酵、单细胞蛋白发酵、废水处理、废气处理等。

## 6.3 好氧生物细胞反应器

### 1. 流体力学特性:

- (1) 流体的流动状态: 流体状态随气速的变化而变化. 低速时, 气泡较均匀, 匀速上升; 较高速时, 形成大气泡, 呈非均匀状态; 高速时, 出现泡沫流, 气相成为连续相, 液相成为分散相
- (2) 相含率: 是指鼓泡塔反应器内不同相所点的体积分数. 气含率是指反应器内气体体积占总体积的百分比, 它是鼓泡塔反应器的重要设计参数之一.

$$\epsilon_G = \frac{V_G}{V} = \frac{V_G}{V_G + V_L}$$

(3) 压力降：忽略液相的惯性和塔壁的摩擦引起的压力降，反应器的压力降  $\Delta P$  主要由两部分组成.

$$\Delta P = \Delta P_S + \Delta P_L \quad \text{一般情况下, } \Delta P_L > \Delta P_S$$

通过沿塔的压力分布的在线测量可以确定气含率在无量纲轴向位置  $Z$  处的压力为

$$P_Z = P_T[1 + \alpha(1 - Z)]$$



### 2. 热量传递

传热通常有两种方式：一种是夹套、蛇管或列管式冷却器；另一种是液体循环外冷却器。

鼓泡塔的传热过程有以下特点：（1）鼓泡引起床层液体循环，使床层内气液的温度分布均匀；（2）由于液体的湍动，壁膜给热系数显著增加；（3）鼓泡位置对传热系数有影响；（4）表观气速对给热系数有影响。

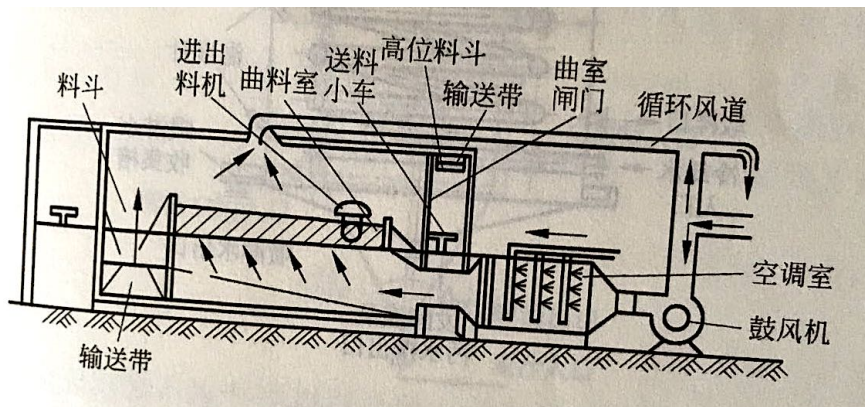
### 五、通风固体发酵设备

传统工艺，设备简单，投资小，广泛应用于酱油、酿酒、生产饲料蛋白。

反应基质以固态形式存在，反应基质中含水量低，反应体系内传递过程复杂，最主要的流动介质是气相。

1. 自然通风固体发酵设备：传统工艺，劳动强度大，易污染，不易控制，占地面积大
2. 机械通风固体发酵设备：传统工艺基础上，增加机械通风装置，使曲层厚度增加，生产效率提高，便于控制

## 6.3 好氧生物细胞反应器



## 6.4 嫌气发酵设备

一、乙醇发酵设备：圆柱形，密闭式

二、啤酒发酵设备：传统工艺采用长方形槽，现代用圆柱锥底发酵罐（锥形罐）。